

**Validation d'un étançonnement
fait d'un tuyau de polyéthylène
haute densité ou de profilés
métalliques normalement
utilisés pour les ponceaux
et les égouts**



**ÉTUDES ET
RECHERCHES**

André Lan
Renaud Daigle
Denis LeBoeuf
Omar Chaallal

Mai 2003

R-336

RAPPORT





Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

NOS RECHERCHES *travaillent* pour vous !

MISSION

- ▶ Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes.
- ▶ Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.
- ▶ Assurer la diffusion des connaissances, jouer un rôle de référence scientifique et d'expert.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission de la santé et de la sécurité du travail.

POUR EN SAVOIR PLUS...

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour.
De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement.
www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CSST.
Abonnement : 1-817-221-7046

Dépôt légal
Bibliothèque nationale du Québec
2003

IRSST - Direction des communications
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : (514) 288-1551
Télécopieur : (514) 288-7636
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca

© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
mai 2003.

Validation d'un étançonnement fait d'un tuyau de polyéthylène haute densité ou de profilés métalliques normalement utilisés pour les ponceaux et les égouts

André Lan et Renaud Daigle
Sécurité-ingénierie, IRSST

Denis LeBoeuf
Université Laval

Omar Chaallal
École de technologie supérieure

ÉTUDES ET
RECHERCHES

RAPPORT

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca



Cette publication est disponible
en version PDF
sur le site Web de l'IRSST.

Cette étude a été financée par l'IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles des auteurs.

CONFORMÉMENT AUX POLITIQUES DE L'IRSST

Les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document
ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

REMERCIEMENTS

La réalisation de cette étude a été rendue possible grâce à la collaboration d'un grand nombre d'organisations et d'individus. Les auteurs tiennent particulièrement à remercier les organisations et les personnes suivantes :

1. APSAM, madame Sylvie Poulin et monsieur Alain Langlois de l'APSAM qui nous ont, entre autres, transmis la demande de validation des tuyaux normalement utilisés pour les travaux d'égouts comme étançonnement temporaire lors des travaux d'excavation temporaire des villes de Longueuil et de Victoriaville et facilité les contacts avec le milieu municipal.
2. La Ville de Longueuil pour avoir fourni le site expérimental et l'ensemble des ressources humaines et matérielles qui ont permis d'effectuer les essais in situ sous d'excellentes conditions et messieurs Michel Binet, Daniel Bourdeau, Lawrence Gagné et les cols-bleus des travaux publics qui ont contribué notamment à l'organisation et à la réalisation des essais en chantier.
3. La Ville de Victoriaville pour avoir fourni le site expérimental et l'ensemble des ressources humaines et matérielles qui ont permis d'effectuer les essais in situ sous d'excellentes conditions et André Charest, Alain Houle et les cols-bleus des travaux publics qui ont contribué notamment à l'organisation et à la réalisation des essais en chantier.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
REMERCIEMENTS.....	i
1. CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE.....	1
1.1 Objectifs de l'étude et démarches suivies	2
1.2 Composition du comité du travail.....	2
1.3 Responsabilité de l'étude et contribution des intervenants	3
1.4 Organisation du rapport	3
2. SYSTÈMES D'ÉTANÇONNEMENT	5
2.1 Généralités sur les tuyaux	5
2.2 Systèmes de la Ville de Longueuil.....	5
2.2.1 Introduction.....	5
2.2.2 TTAOG-36.....	10
2.2.3 PEHD-36.....	10
2.3 Système de la Ville de Victoriaville	12
2.3.1 Introduction.....	12
2.3.2 TTAOG-60.....	14
2.4 Comportement des tuyaux flexibles.....	15
2.4.1 Flexible versus rigide.....	15
2.4.2 Comportement mécanique des tuyaux	18
2.4.3 Comportement structural d'un tuyau flexible enfoui	24
2.4.4 Aspects particuliers aux tuyaux plastiques	25
3. PROGRAMME D'ESSAIS.....	31
3.1 Objectifs spécifiques.....	31
3.2 Description du programme d'essais en laboratoire	31
3.2.1 Généralités et objectifs des essais	31
3.2.2 Spécimens d'essai.....	33
3.2.3 Instrumentation	33
3.3 Description du programme d'essais en chantier.....	35
3.3.1 Programme d'essais.....	35
3.3.2 Types d'excavation.....	36
3.3.3 Localisation et description géotechnique des sites	37
3.3.4 Appareil de mesure de la convergence et précision.....	38
3.4 Déroulement des essais	42
3.4.1 Essais en laboratoire	42
3.4.2 Essais en chantier.....	42
4. RÉSULTATS DES ESSAIS.....	57
4.1 Essais de laboratoire	57
4.1.1 TTAOG-36 (Longueuil).....	57
4.1.2 PEHD-36 (Longueuil).....	60
4.1.3 TTAOG-60 (Victoriaville).....	63

TABLE DES MATIÈRES

	Page
4.2	Rigidité et facteur de rigidité initiaux65
4.3	Analyses des résultats d'essais de laboratoire66
4.4	Essais en chantier67
4.4.1	Essai n° 1.1.A (TAOG-36) - Ville de Longueuil67
4.4.2	Essai n° 1.1.B (TTOG-36) - Ville de Longueuil68
4.4.3	Essai n° 1.2B (PHED-36) - Ville de Longueuil69
4.4.4	Essai n° 2.3.A (TTAOG-60) - Ville de Victoriaville69
4.4.5	Essai n° 2.3.B (TTAOG-60) - Ville de Victoriaville69
5.	SIMULATIONS NUMÉRIQUES DU COMPORTEMENT DES TUYAUX75
5.1	Généralités75
5.2	Description du logiciel et des paramètres utilisés75
5.2.1	Présentation du logiciel FLAC75
5.2.2	Méthodologie de simulation avec FLAC76
5.3	Programme de simulations numériques76
5.3.1	Problématique76
5.3.2	Modes de chargement77
5.3.3	Programme de simulations numériques77
5.3.4	Modèles FLAC77
5.3.5	Paramètres mécaniques et géométriques du sol et des tuyaux78
5.4	Résultats des simulations numériques78
5.4.1	Généralités78
5.4.2	Simulation 2.3.A- TTAOG-6079
5.4.3	Simulation 2.3.B- TTAOG-6079
5.4.4	Simulation 1.1.4- TTAOG-3680
5.4.5	Simulation 1.1.A*- PEHD-3680
6.	ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS115
6.1	Généralités115
6.2	Analyse des déplacements115
6.2.1	Excavation de type A115
6.2.2	Excavation de type B117
6.3	Analyse des forces119
6.4	Performance en chantier120
7.	CONCLUSION123
7.1	Rappel du programme d'essais123
7.2	Conclusions générales125
7.3	Conclusions spécifiques et recommandations126
	RÉFÉRENCES GÉNÉRALES127
	ANNEXE - RÉFÉRENCES

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1 - Comité de travail.....	2
Tableau 2.1 - Propriétés géométriques du TTAOG-36.....	10
Tableau 2.2 - Propriétés géométriques du PEHD-36.....	12
Tableau 2.3 - Propriétés géométriques du TTAOG-60.....	14
Tableau 3.1 - Propriétés géométriques mesurées des spécimens.....	33
Tableau 3.2 - Description du programme d'essais en chantier.....	36
Tableau 3.3 - Mesures in situ de densité.....	37
Tableau 3.4 - Caractéristiques générales des essais.....	43
Tableau 4.1 - Valeurs caractéristiques mesurées du TTAOG-36.....	59
Tableau 4.2 - Rigidité et facteur de rigidité correspondant à $\Delta_y = 5\%$ et $\Delta_y = 10\%$ (TTAOG-36).....	59
Tableau 4.3 - Valeurs caractéristiques mesurées du PEHD-36.....	62
Tableau 4.4 - Rigidité et facteur de rigidité correspondant à $\Delta_y = 5\%$ et $\Delta_y = 10\%$ (PEHD-36).....	62
Tableau 4.5 - Valeurs caractéristiques mesurées du TTAOG-60.....	65
Tableau 4.6 - Rigidité et facteur de rigidité correspondant à $\Delta_y = 5\%$ et $\Delta_y = 10\%$ (TTAOG-60).....	65
Tableau 4.7 - Rigidité et facteur de rigidité réels mesurés.....	66
Tableau 4.8 - Essai en chantier 1.1.A Ville de Longueuil - TTAOG-36 (900 mm).....	70
Tableau 4.9 - Essai en chantier 1.1.B Ville de Longueuil - TTAOG-36 (900 mm).....	71
Tableau 4.10 - Essai en chantier 1.2.B Ville de Longueuil - PEHD-36 (900 mm).....	72
Tableau 4.11 - Essai en chantier 2.3.A Essai en chantier 2.3.A Ville de Victoriaville - TTAOG-60 (1 500 mm).....	73
Tableau 4.12 - Essai en chantier 2.3.B Ville de Victoriaville - TTAOG-60 (1 500 mm).....	74
Tableau 5.1 - Programme des simulations numériques effectuées avec FLAC.....	77
Tableau 5.2 - Propriétés mécaniques des sols utilisés dans les simulations.....	78
Tableau 5.3 - Propriétés mécaniques des tuyaux utilisés dans les simulations.....	78
Tableau 5.4 - Essai 2.3.A : TTAOG-60 - Excavation de type A Efforts de cisaillement, axiaux et moments dans le tuyau TTAOG-60.....	91
Tableau 5.5 - Essai 2.3.B : TTAOG-60 - Excavation de type B Efforts de cisaillement, axiaux et moments dans le tuyau TTAOG-60.....	98
Tableau 5.6 - Essai 1.1.A : TTAOG-36 - Excavation de type A Efforts de cisaillement, axiaux et moments dans le tuyau TTAOG-36.....	107
Tableau 5.7 - Essai 1.1A* : PEHD-36 - Excavation de type A Efforts de cisaillement, axiaux et moments dans le tuyau PEHD-36.....	113
Tableau 6.1 - Excavation de type « A » Tableau récapitulatif des déplacements.....	116
Tableau 6.2 - Excavation de type « A » Coefficients de sécurité (en fonction des déplacements).....	117
Tableau 6.3 - Excavation de type « B » Tableau récapitulatif des déplacements.....	118
Tableau 6.4 - Excavation de type « B » Coefficients de sécurité (en fonction des déplacements).....	118
Tableau 6.5 - Analyse des forces appliquées sur les tuyaux.....	119

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 - Méthodologie de validation utilisée	4
Figure 2.1 - Système de la Ville de Longueuil : tuyau TTAOG-36 (diamètre nominal = 900 mm).....	6
Figure 2.2 - Système de la Ville de Longueuil : tuyau PEHD-36 (diamètre nominal = 900 mm).....	6
Figure 2.3 (a) - Équipement utilisé pour l'hydrocuretage (forage par aspiration ou vacuum)	7
Figure 2.3 (b) - Équipement utilisé pour l'hydrocuretage (forage par aspiration ou vacuum)	8
Figure 2.4 (a) - Trou foré par la méthode par aspiration (hydrocuretage).....	9
(b) - Lance avec jet d'eau pour remuer le sol en fond de trou et tuyau d'aspiration.....	9
Figure 2.5 - Tuyau d'acier ondulé en tôle galvanisée TTAOG-36 HELCOR utilisé pour les essais en chantier (diamètre nominal = 900 mm ou 36 pouces).....	11
Figure 2.6 - Tuyau TTAOG-60 utilisé par la Ville de Victoriaville	13
Figure 2.7 - Système de fixation de l'échelle à la paroi du tuyau et de levage à l'aide d'œillets spécialement conçus	14
Figure 2.8 - Classification des conduites flexibles (modifiée d'après Plastiques Big 'O' et Watkins et Reeves, 1980)	16
Figure 2.9 - Effet d'arche se développant dans le sol autour d'une conduite flexible (modifiée d'après Plastiques Big 'O' et Watkins et Reeves, 1980).....	17
Figure 2.10 - Analyse des contraintes pour un anneau circulaire dans le sol (modifiée d'après Watkins et Anderson, 1999)	20
Figure 2.11 - Diagramme des corps libres pour une section infinitésimale d'anneau (modifiée d'après Watkins et Anderson, 1999)	21
Figure 2.12 - Déflexion ellipsoïdale d'un élément de tuyau sous l'effet de la compression axiale du sol de remblai (modifiée d'après Watkins et Anderson, 1999).....	22
Figure 2.13 - Illustration des caractéristiques géométriques d'une ellipse en relation avec l'analyse de la déflexion d'une section de tuyau sous remblai (modifiée d'après Watkins et Anderson, 1999)	22
Figure 2.14 - Relation pression extérieure/déflexion - Cas d'un anneau flexible non supporté latéralement (modifiée d'après Watkins et Anderson, 1999).....	24
Figure 2.15 - Comportement d'un tuyau enfoui en fonction de la densité du sol et du niveau de compaction : (a) Déflexion diamétrale versus rigidité et (b) Contrainte - déformation typique pour le sol non cohésif (modifiée d'après Watkins et Anderson, 1999)	26
Figure 2.16 - Module de réaction du sol en fonction de la profondeur et du degré de compactage Proctor du remblai (modifiée d'après Plastiques Big 'O' et Watkins et Reeves, 1980).....	27
Figure 2.17 - Couverture minimale requise (rapport H/D) (modifiée d'après Plastiques Big 'O' et Watkins et Reeves, 1980).....	28
Figure 2.18 - Comportement à court terme et à long terme (fluage ou <i>creep</i>) d'une conduite (modifiée d'après Watkins et Anderson, 1999)	28
Figure 2.19 - Évolution en fonction du temps de la résistance à court terme et à long terme (modifiée d'après Watkins et Anderson, 1999)	29

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 3.1 - Croquis illustrant la rigidité de la conduite (modifiée d'après Plastiques Big'O' et Watkins et Reeves, 1980)	32
Figure 3.2 - TTAOG-36 : Essai en laboratoire	34
Figure 3.3 - PEHD-36 : Essai en laboratoire	34
Figure 3.4 - TTAOG-60 : Essai en laboratoire	35
Figure 3.5 - Schéma type des excavations de type A a) Vue en coupe; b) Vue en plan.....	39
Figure 3.6 - Schéma type des excavations de type B a) Vue en coupe; b) Vue en plan.....	40
Figure 3.7 - Localisation des deux sites d'essais de la Ville de Longueuil.....	41
Figure 3.8 - Localisation du site d'essais de la Ville de Victoriaville	41
Figure 3.9 - Essai 1.1.A : Excavation de la tranchée d'essai - 19 juin 2001	45
Figure 3.10 - Essai 1.1.A : Transport du TTAOG dans la tranchée d'essai - 19 juin 2001	45
Figure 3.11 - Essai 1.1.A : Installation du TTAOG-36 dans la tranchée d'essai - 19 juin 2001	46
Figure 3.12 - Essai 1.1.A : Remblayage de la tranchée avec du sable - 19 juin 2001	47
Figure 3.13 - Essai 1.1.A : Surcharge avec 4 blocs de béton posés sur le sable remblayé près du TTAOG-36 - 19 juin 2001	48
Figure 3.14 - Essai 1.1.B : Excavation de la tranchée B et mise en place du TTAOG-36 en fond de tranchée - Ville de Longueuil - 19 juin 2001	49
Figure 3.15 - Essai 1.1.B : Remblayage de la tranchée B par du sable sur 1,8 m et par l'argile brune sur 0,5 m - TTAOG-36 - Ville de Longueuil - 19 juin 2001	49
Figure 3.16 - Essai 1.1.B : Fin du remblayage de la tranchée B - TTAOG-36 Ville de Longueuil	50
Figure 3.17 - Essai 1.1.B : Surcharge par des blocs posés près du TTAOG-36 Ville de Longueuil	50
Figure 3.18 - Essai 1.1.B : Extraction et observation du TTAOG-36 après le chargement Ville de Longueuil	51
Figure 3.19 - Essai 1.2.B : Mise à l'essai du PEHD-36 dans la tranchée B Ville de Longueuil	51
Figure 3.20 - Essai 1.2.B : Remplissage de la tranchée B par du sable et du remblai - PEHD-36 Ville de Longueuil.....	52
Figure 3.21 - Essai 1.2.B : Mesure des déformations et observation du comportement PEHD-36 - Ville de Longueuil	52
Figure 3.22 - Essai 1.2.B : Surcharge par des blocs posés près du PEHD-36 - Ville de Longueuil	53
Figure 3.23 - Essai 2.3.A : Excavation de la tranchée A (avec une paroi inclinée à 45 degrés) Ville de Victoriaville.....	54
Figure 3.24 - Essai 2.3.A : Transport du TTAOG-60 dans la tranchée A Ville de Victoriaville - 21 juin 2001	54
Figure 3.25 - Essai 2.3.A : Mise en place du TTAOG-60 dans la tranchée A Ville de Victoriaville.....	55

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 3.26 - Essai 2.3.A : Début du remblayage autour du TTAOG-60 Ville de Victoriaville.....	55
Figure 3.27 - Essai 2.3.B : Début du remblayage autour du TTAOG-60 Ville de Victoriaville.....	56
Figure 4.1 - Essais de laboratoire sur le TTAOG-36 : courbes contraintes-déformations (v = 12,7 mm/min)	58
Figure 4.2 - Essais de laboratoire sur PEHD-36 : courbes contraintes-déformations (v = 12,7 mm/min)	61
Figure 4.3 - Essais de laboratoire sur le TTAOG-60 : courbes contraintes-déformations (v = 12,7 mm/min)	64
Figure 5.1 - Méthodologie de modélisation numérique avec FLAC (Itasca, 1998).....	82
Figure 5.2 - Modes de chargement utilisés dans les simulations : (a) tranchée de type A; b) tranchée de type B	83
Figure 5.3 - Conditions aux frontières utilisées pour les modèles numériques : (a) tranchée de type A; b) tranchée de type B.....	84
Figure 5.4 - Essai 2.3.A : TTAOG-60 - Excavation de type A Maillage, conditions aux frontières et pression appliquée.....	85
Figure 5.5 - Essai 2.3.A : TTAOG-60 - Excavation de type A Zoom sur le maillage et les éléments structuraux (en jaune) représentant le TTAOG-60.....	86
Figure 5.6 - Essai 2.3.A : TTAOG-60 - Excavation de type A Historique de l'évolution de σ_{yy} (en Pascal) en fct du déplacement vertical (en m) pour l'élément (1,14) durant le chargement.....	87
Figure 5.7 - Essai 2.3.A : TTAOG-60 - Excavation de type A Historique de l'évolution du déplacement horizontal (en m) en fct de σ_{xx} (en Pascal) pour l'élément (6,10) durant le chargement	88
Figure 5.8 - Essai 2.3.A : TTAOG-60 - Excavation de type A Déformée du tuyau en fin de chargement et vecteurs de déplacement calculés par FLAC.....	89
Figure 5.9 - Essai 2.3.A : TTAOG-60 - Excavation de type A Isocontours de σ_{yy} , du déplacement vertical (<i>ydisp</i>).....	90
Figure 5.10 - Essai 2.3.B : TTAOG-60 - Excavation de type B Maillage, conditions aux frontières et pression appliquée aux frontières (lors de la dernière étape de calcul)	92
Figure 5.11 - Essai 2.3.B : TTAOG-60 - Excavation de type B Zoom sur le maillage et les éléments structuraux (en jaune) représentant le TTAOG-60 (en raison de la symétrie, seulement 1/4 du tuyau nécessite d'être modélisé).....	93
Figure 5.12 - Essai 2.3.B : TTAOG-60 - Excavation de type B Historique de l'évolution du déplacement vertical (en m) en fct de σ_{yy} (en Pascal) pour le nœud (1,21) durant le chargement	94
Figure 5.13 - Essai 2.3.B : TTAOG-60 - Excavation de type B Historique de l'évolution du déplacement horizontal (<i>xdisp</i>) en fct de σ_{xx} pour le nœud (1,1) durant le chargement (<i>note : les déplacements sont très faibles</i>)	95
Figure 5.14 - Essai 2.3.B : TTAOG-60 - Excavation de type B Déformée du tuyau en fin de chargement et vecteurs de déplacement calculés par FLAC.....	96

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 5.15 - Essai 2.3.B : TTAOG-60 - Excavation de type B Isocontours de la contrainte σ_{yy} et vecteurs-déplacements calculés par FLAC	97
Figure 5.16 - Essai 2.3.B : TTAOG-60 - Excavation de type B Distribution des moments de flexion le long du TTAOG-60	99
Figure 5.17 - Essai 2.3.B : TTAOG-60 - Excavation de type B Distribution des efforts axiaux (N) le long du TTAOG-60	100
Figure 5.18 - Essai 1.1.A : TTAOG-36 - Excavation de type A Maillage, conditions aux frontières, localisation du tuyau et pression $\Delta\sigma_{yy}$ appliquée au remblai.....	101
Figure 5.19 - Essai 1.1.A : TTAOG-36 - Excavation de type A Zoom sur le maillage et les éléments structuraux représentant le TTAOG-60	102
Figure 5.20 - Essai 1.1.A : TTAOG-36 - Excavation de type A Historique de l'évolution du déplacement vertical (en m) en fct de σ_{yy} (en Pascal) pour le nœud (1,14) durant le chargement	103
Figure 5.21 - Essai 1.1.A : TTAOG-36 - Excavation de type A Historique de l'évolution du déplacement horizontal (en m) en fct de σ_{xx} (en Pascal) pour le nœud (5,9) durant le chargement	104
Figure 5.22 - Essai 1.1.A : TTAOG-36 - Excavation de type A Déformée du tuyau en fin de chargement et vecteurs de déplacement calculés par FLAC.....	105
Figure 5.23 - Essai 1.1.A : TTAOG-36 - Excavation de type A Isocontours de la contrainte σ_{yy} et du déplacement horizontal.....	106
Figure 5.24 - Essai 1.1.A : PEHD-36 - Excavation de type A Maillage, conditions aux frontières, localisation du tuyau et pression $\Delta\sigma_{yy}$ appliquée au remblai (<i>NOTE : cet essai n'a pas été réalisé sur le terrain</i>).....	108
Figure 5.25 - Essai 1.1.A : PEHD-36 - Excavation de type A Déformée du tuyau en fin de chargement et vecteurs de déplacement calculés par FLAC.....	109
Figure 5.26 - Essai 1.1.A : PEHD-36 - Excavation de type A Historique de l'évolution du déplacement vertical (en m) en fct de σ_{yy} (en Pascal) pour le nœud (1,14) durant le chargement	110
Figure 5.27 - Essai 1.1.A : PEHD-36 - Excavation de type A Historique de l'évolution du déplacement horizontal (en m) en fct de σ_{xx} (en Pascal) pour le nœud (5,9) durant le chargement	111
Figure 5.28 - Essai 1.1.A* : PEHD-36 - Excavation de type A Isocontours de σ_{yy}	112
Figure 6.1 - Calcul de la force résultante (P_{res}) sur une section du tuyau avec FLAC	119
Figure 6.2 - Isocontours de la contrainte σ_{yy} montrant les secteurs de concentration des contraintes autour du tuyau – Essai 1.1.1A – TTAOG-36.....	120

1. CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE

Les employés municipaux effectuent de nombreuses interventions pour entretenir ou effectuer des branchements aux égouts et aqueducs. Ces travaux impliquent des excavations plus ou moins profondes avec des parois verticales qui doivent être étançonnées pour protéger les travailleurs. L'ensevelissement de travailleurs au fond des tranchées lors de l'effondrement des parois cause au minimum 1,2 mort par an, soit environ 1 % des décès au Québec (Bouchard, P., 1989). L'examen de plusieurs cas d'effondrement montre une absence totale d'étançonnement et la présence de parois presque verticales (Stanevick, R. L., Middleton, D. C., 1988). Depuis quelques années, la Commission de la santé et de la sécurité du travail (CSST) mène une campagne pour l'étançonnement des excavations. Sur le plan technique, des systèmes de blindage ou d'étançonnement éprouvés existent. Ils sont composés de panneaux rigides, souvent complexes et lourds à mettre en place, surtout pour les tranchées de moindre envergure comme c'est souvent le cas en milieu urbain (Lan et al., 1997). Compte tenu de la diversité des travaux d'excavation, les municipalités sont toujours à la recherche de nouveaux moyens d'étançonner (Tremblay, M., 1994). C'est ainsi qu'est venue l'idée d'utiliser sur le réseau d'aqueduc et d'égouts, un tuyau d'égout en polyéthylène haute densité (PEHD) ou un tuyau en tôle d'acier ondulé galvanisé (TTAOG) comme étançonnement lors des travaux de courte durée où les systèmes éprouvés de blindage ne peuvent pas être utilisés et/ou l'excavation ne peut pas être effectuée avec une rétroexcavatrice. Lors de ces travaux, l'excavation est effectuée par hydrocuretage à l'aide d'une excavatrice dite à vacuum. Cette excavatrice permet de creuser un puits à paroi verticale de dimensions ajustées au diamètre du tuyau, ce qui réduit considérablement les dimensions en plan de l'excavation. Le PEHD ou le TTAOG est alors descendu dans le puits pour étançonner l'excavation. Par ailleurs, la paroi de l'excavation étant très proche de celle du tuyau, les risques d'éboulement et de glissement du tuyau sont éliminés, ce qui rend l'étançonnement plus sécuritaire.

Les tuyaux PEHD et TTAOG ont été conçus suivant les exigences relatives aux conduites d'eau et d'égouts. Leurs caractéristiques mécaniques propres, telles que la résistance à la compression, à l'impact, etc., sont connues. Mais le comportement de ces tuyaux utilisés dans un contexte d'étançonnement vertical et soumis à la pression des terres n'a jamais fait l'objet de calculs ou d'essais systématiques en chantier ou en laboratoire. L'utilisation de ces tuyaux lors de travaux d'excavation pour la réparation de vannes de rue ou de boîtes de service semble croissante dans les petites municipalités. Dans ce contexte, la présente étude a été initiée suite à une demande formulée par l'Association paritaire pour la santé et la sécurité secteur « affaires municipales » (APSAM) à l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) sur la sécurité d'utilisation des tuyaux d'égout en polyéthylène haute densité (PEHD) ou des profilés métalliques (TTAOG), généralement utilisés pour les ponceaux ou pour les égouts, comme structure d'étançonnement temporaire pour des travaux en tranchées. Cette idée émane d'un intervenant en milieu municipal et elle présente un potentiel élevé d'utilisation. Elle a l'avantage de satisfaire beaucoup de contraintes rencontrées lors des travaux d'étançonnement en milieu municipal. Si les tuyaux réussissent avec succès les essais de validation comme étançonnement temporaire lors des travaux d'excavation, leur utilisation pourrait être généralisée aux autres municipalités du Québec.

1.1 Objectifs de l'étude et démarches suivies

L'objectif de la présente étude est de valider l'utilisation du concept d'un profilé métallique (TTAOG) ou en polyéthylène haute densité (PEHD) de forme circulaire comme système d'étançonnement à court terme dans les travaux d'excavation et d'en préciser, s'il y a lieu, les limites d'utilisation. Plus spécifiquement, cette étude vise à déterminer, à travers une approche globale intégrant l'expérimentation informatique (par simulation d'un modèle numérique du système tuyau-sol), l'expérimentation en chantier ainsi qu'en laboratoire, la capacité critique des tuyaux d'égout en polyéthylène haute densité (PEHD) et en tôle d'acier ondulé galvanisé (TTAOG) comme système d'étançonnement vertical d'excavations temporaires.

En laboratoire, les profilés ont été soumis à l'essai de chargement par plaques parallèles pour permettre la détermination de la rigidité diamétrale et la déformation maximale avant flambage local. Les essais en chantier ont été effectués pour différentes conditions de chargement et pour différents types d'excavation. La convergence (ou le déplacement) des parois du tuyau lors du chargement a été suivie à l'aide d'un lasermètre PD10 de Hilti. C'est un système de mesure de déplacement à infrarouge adapté pour ces tuyaux. Les mesures ont été complétées par des observations visuelles.

La figure 1.1 représente schématiquement les éléments de l'approche globale. L'intérêt de cette approche de validation est qu'elle rend possible une confrontation des résultats et des observations et autorise ainsi une plus grande confiance dans l'interprétation de ceux-ci et la formulation des conclusions et recommandations.

1.2 Composition du comité du travail

Le comité du travail était sous la direction de l'IRSST, de l'Université Laval et de l'École de technologie supérieure (ÉTS). Le tableau 1.1 présente les membres et leur champ d'expertise respectif.

Tableau 1.1 - Comité de travail

Membre	Institution	Expertise
André Lan, ing.	IRSST	SST et protection contre les chutes
Renaud Daigle, technicien	IRSST	SST
Denis LeBoeuf, ing., Ph.D.	Université Laval	Géotechnique
Omar Chaallal, ing., Ph.D.	ÉTS	Structures
Michel Binet, Chef de division	Ville de Longueuil	Voirie
Daniel Bourdeau, Contremaître	Ville de Longueuil	Canalisations municipales
Lawrence Gagné, Contremaître	Ville de Longueuil	Canalisations municipales
André Charest, Surintendant	Ville de Victoriaville	Travaux Publics
Alain Houle, Contremaître	Ville de Victoriaville	Aqueduc

1.3 Responsabilité de l'étude et contribution des intervenants

L'IRSSST, responsable de l'étude, a confié à monsieur Denis LeBoeuf de l'Université Laval et à monsieur Omar Chaallal de l'ÉTS, le mandat de valider par calcul et par expérimentation en laboratoire et en chantier l'utilisation d'un TTAOG et/ou d'un tuyau en PEHD comme étançonnement pour des travaux d'excavation temporaires ne dépassant pas 2,4 m (8 pieds). Pour la Ville de Longueuil, messieurs Michel Binet, Daniel Bourdeau et Lawrence Gagné et leur équipe de travailleurs ont contribué à l'organisation et à la réalisation des travaux en chantier. Pour la Ville de Victoriaville, messieurs André Charest et Alain Houle et leur équipe de travailleurs du service des travaux publics ont collaboré activement à la réalisation des essais en chantier. Madame Sylvie Poulain de l'APSAM fera la diffusion des résultats de la présente étude auprès du milieu municipal du Québec.

1.4 Organisation du rapport

Le présent rapport est organisé en sept sections. La section 1 pose la problématique et dresse les objectifs du mandat. La section 2 décrit les systèmes d'étançonnement utilisés par les Villes de Longueuil et Victoriaville en plus de présenter certains éléments théoriques nécessaires à la compréhension du comportement de ces tuyaux. Le programme d'essais en laboratoire et en chantier est présenté et discuté à la section 3, tandis que l'ensemble des résultats est regroupé à la section 4. Les résultats des simulations numériques sur les systèmes sol-tuyau effectuées avec le logiciel FLAC font l'objet de la section 5 et l'analyse complète des résultats incluant la comparaison des données de terrain, de laboratoire et de simulation est présentée à la section 6. Cette section présente également les observations quant à la performance et à l'utilisation pratique des tuyaux TTAOG et PEHD en chantier. Enfin, la section 7 présente les conclusions de l'étude et offre des recommandations quant à l'utilisation sécuritaire de ces tuyaux comme moyen d'étançonnement.

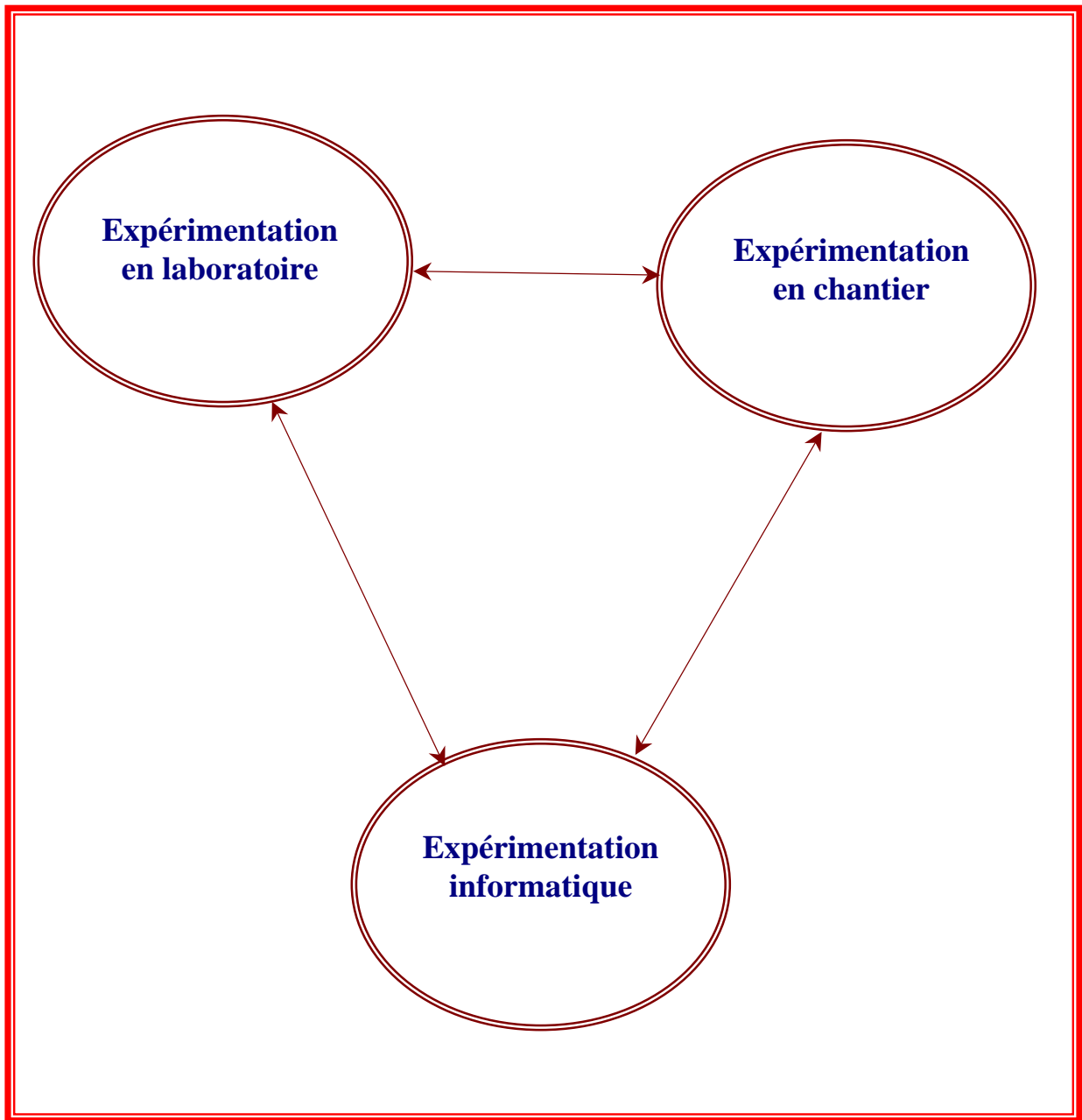


Figure 1.1 - Méthodologie de validation utilisée

2. SYSTÈMES D'ÉTANÇONNEMENT

2.1 Généralités sur les tuyaux

Les tuyaux utilisés pour les ponceaux et égouts sont généralement classés en fonction de leur comportement structural dans les deux catégories suivantes : (a) tuyaux rigides et (b) tuyaux flexibles. Les tuyaux en béton, en amiante de ciment, en fonte et en acier à paroi épaisse font partie des tuyaux rigides ainsi que les TTAOG ou en aluminium et les tuyaux plastiques en chlorure de polyvinyle (PVC) ou en PEHD font partie des tuyaux flexibles. La différence de comportement entre ces deux catégories sera expliquée dans la section 2.4. Les tuyaux, rigides comme flexibles, sont normalement universellement utilisés comme conduites de drainage d'eaux usées et pluviales et de distribution d'eau potable. Ils sont donc généralement enfouis « couchés » à différentes profondeurs. Leur dimensionnement est fonction des caractéristiques hydrauliques recherchées, de la pression à laquelle ils sont assujettis, ainsi que de la profondeur d'enfouissement. Il se fait de façon aisée grâce à des normes (ex. : AASHTO), des formules empiriques (ex. : IOWA) et des abaques fournis par les manufacturiers. Pour plus d'information sur le sujet, le lecteur est encouragé à consulter les références dont la liste est présentée en annexe.

2.2 Systèmes de la Ville de Longueuil

2.2.1 Introduction

La Ville de Longueuil a retenu deux types de tuyaux comme système d'étançonnement : (a) un tuyau en tôle d'acier ondulé galvanisé, désigné par TTAOG-36 (voir Figure 2.1), de 36 pouces (900 mm) de diamètre et d'environ 8 pieds (2400 mm) de longueur, et (b) un tuyau en polyéthylène haute densité, désigné par PEHD-36 (voir figure 2.2), également de 36 pouces de diamètre et 8 pieds (2400 mm) de longueur. Un tuyau de 36 pouces peut certes présenter des inconvénients quant à l'accès et l'espace requis pour permettre à un ouvrier (surtout s'il est de forte corpulence) d'intervenir dans des conditions confortables. Par contre, il présente également des avantages notamment lorsque l'excavation est exécutée par hydrocuretage. Des photographies illustrant l'utilisation de cette technique sont regroupées aux figures 2.3 et 2.4.



**Figure 2.1 - Système de la Ville de Longueuil : tuyau TTAOG-36
(diamètre nominal = 900 mm)**



**Figure 2.2 - Système de la Ville de Longueuil : tuyau PEHD-36
(diamètre nominal = 900 mm)**



Figure 2.3 (a) - Équipement utilisé pour l'hydrocuretage (forage par aspiration ou vacuum)



Figure 2.3 (b) - Équipement utilisé pour l'hydrocuretage (forage par aspiration ou vacuum)



(a)



(b)

**Figure 2.4 - (a) Trou foré par la méthode par aspiration (hydrocuretage)
(b) Lance avec jet d'eau pour remuer le sol en fond de trou et tuyau d'aspiration**

2.2.2 TTAOG-36

Le tuyau en tôle d'acier ondulé galvanisé (TTAOG) de 36 pouces (900 mm) de diamètre utilisé par la Ville de Longueuil est fabriqué par *Armtec*, autrefois *Armco Westeel*, et mis en marché sous le nom de *HEL-COR*. Le tuyau en question (figures 2.1 et 2.5) est à paroi mince, donc léger, et présente des ondulations hélicoïdales qui lui confèrent une rigidité et une résistance à la compression (écrasement diamétral) accrues tout en minimisant la déflexion au cours du compactage du remblai. Le joint agrafé en continu est réalisé en repliant sur eux-mêmes les rebords de tôles adjacentes et en les compressant de façon à les emboîter et former ainsi un joint solide.

Les sections de tuyau *HEL-COR* sont longues et légères, de manutention facile et leur installation s'effectue aisément en utilisant un équipement léger. Deux types de finis appliqués en usine sont offerts afin de rencontrer les normes de durabilité : (a) acier galvanisé, qui consiste en un enduit de zinc appliqué en continu. Ce fini offre généralement une protection suffisante pour la majorité des installations; (b) acier aluminisé, qui est fabriqué à partir d'une bobine d'acier trempé à chaud dans un bain d'aluminium commercial pur. Ce fini offre une protection accrue adaptée à des environnements plus corrosifs.

Les propriétés géométriques pertinentes du TTAOG-36 utilisé par la Ville de Longueuil sont présentées dans le Tableau 2.1.

Tableau 2.1 - Propriétés géométriques du TTAOG-36

Désignation	Dimensions
Diamètre nominal	900 mm (36 po.)
Ondulations (portée x profondeur)	68 mm x 13 mm
Épaisseur nominale de la paroi	1.6 mm
Longueur standard	6 m

2.2.3 PEHD-36

Le tuyau en polyéthylène haute densité (PEHD) de 36 pouces (900 mm) de diamètre utilisé par la Ville de Longueuil comme alternative au TTAOG-36 est fabriqué par *SOLENO Inc.* et commercialisé sous le nom de *SOLFLO MAX*. Le tuyau en question (figure 2.2) est à double paroi. Sa paroi extérieure ondulée lui confère une haute résistance mécanique et une rigidité accrue et sa paroi intérieure lisse lui assure des caractéristiques supérieures d'écoulement en plus de lui procurer une rigidité dans l'axe longitudinale.

Selon le fournisseur, la rigidité minimale (R320) est de 320 kPa à 5 % de déflexion. Le tuyau PEHD est disponible en diamètres variant entre 100 mm et 900 mm (entre 4 et 36 pouces) et est disponible en longueur standard de 5.8 m avec cloche, en ponceau de 6 m ou 9 m. Le tuyau *SOLFLO MAX* a été conçu pour une variété d'utilisation : ponceaux, égouts pluviaux et égouts de rétention. On s'en sert également pour les systèmes de captage des produits de lixiviation des sites d'enfouissement. Le tuyau est facile d'installation car léger (13 fois plus léger que le béton).



Figure 2.5 - Tuyau d'acier ondulé en tôle galvanisée TTAOG-36 HELCOR utilisé pour les essais en chantier (diamètre nominal = 900 mm ou 36 pouces)

Les propriétés pertinentes du PEHD-36 utilisé par la Ville de Longueuil sont présentées dans le Tableau 2.2.

Tableau 2.2 - Propriétés géométriques du PEHD-36

Désignation	Dimensions
Diamètre nominal	900 mm (36 po)
Diamètre intérieur	1046 mm (41,1 po)
Diamètre extérieur	912 mm (36 po)
Longueur standard	6 m (20 pi)
Rigidité (<i>parallel plate</i>)	320 kPa

2.3 Système de la Ville de Victoriaville

2.3.1 Introduction

La Ville de Victoriaville utilise comme système d'étançonnement un tuyau en tôle d'acier galvanisé de 60 pouces (1500 mm) de diamètre nominal et de 8 pieds (2400 mm) de longueur approximative qui est désigné par le TTAOG-60. Le tuyau est muni de renforts en acier, boulonnés le long du tuyau et d'œillets permettant une manipulation aisée du tuyau (figure 2.6). Par ailleurs, le système comprend une échelle munie d'un système de fixation à la paroi du tuyau qui lui confère une meilleure stabilité en limitant les mouvements de balancier (figure 2.7).

À remarquer que le TTAOG-60, bien que relativement léger, est nettement plus imposant et plus lourd que le TTAOG-36. Néanmoins, comme le TTAOG-36, sa manutention se fait aisément à l'aide d'équipements légers. Par ailleurs, de par l'importance de son diamètre, le système offre plus d'espace d'accès et de travail que le TTAOG-36. Par contre, la Ville de Victoriaville ne disposant pas d'une excavatrice à vacuum, le système n'est pas conçu pour être utilisé dans un trou à paroi verticale de dimensions ajustées mais plutôt dans une excavation talutée et ouverte.



Figure 2.6 - Tuyau TTAOG-60 utilisé par la Ville de Victoriaville



Figure 2.7 - Système de fixation de l'échelle à la paroi du tuyau et de levage à l'aide d'œillets spécialement conçus

2.3.2 TTAOG-60

Le tuyau en tôle d'acier ondulé galvanisé (TTAOG) de 60 pouces (1500 mm) de diamètre nominal utilisé par la Ville de Victoriaville est fabriqué et commercialisé par SOLENO (Les aciers SOLENO Inc.). Le tuyau SOLENO ondulé est disponible en diamètres variant entre 300 et 3600 mm. Par ailleurs, les détails de fabrication, de finis et de longueurs standards sont les mêmes que ceux du TTAOG-36 (voir Section 2.2.2.).

Les propriétés géométriques pertinentes du TTAOG-60 utilisé par la Ville de Victoriaville sont présentées dans le Tableau 2.3.

Tableau 2.3 - Propriétés géométriques du TTAOG-60

Désignation	Dimensions
Diamètre nominal	1500 mm (60 po)
Ondulations (portée × profondeur)	68 mm × 13 mm
Épaisseur nominale de la paroi	3,5 mm

2.4 Comportement des tuyaux flexibles

2.4.1 Flexible versus rigide

Les tuyaux sont généralement enfouis en profondeur dans le sol et forment ainsi avec le sol environnant (emprunt granulaire compacté) un système structural composé non seulement du tuyau mais également du sol avoisinant. Le comportement d'un tel système relève donc de l'interaction sol-structure. C'est le degré de cette interaction qui qualifie le tuyau comme flexible ou rigide, dépendamment de sa rigidité diamétrale par rapport à celle du sol qui l'enveloppe. Il faut noter que cette qualification est un aspect majeur dans le dimensionnement du tuyau. Dans le cas de tuyau flexible, la charge est principalement reprise par le sol moyennant un effet d'arche, alors que dans le cas de tuyau rigide, la quasi totalité de la charge est reprise par le tuyau. Ceci explique toute l'importance du choix des propriétés du sol de remblai dans le cas de tuyau flexible. Par ailleurs, le mode de rupture et les déformations limites avant rupture sont essentiellement différents pour les deux catégories de tuyau (voir figure 2.8).

Tel qu'expliqué plus haut, dans le cas de tuyaux rigides tels que ceux en béton, le support latéral est très faible, souvent non existant et l'anneau doit résister seul aux moments fléchissants induits par les charges verticales. Par opposition, l'anneau flexible s'écrase quelque peu et soulage le tuyau d'une part importante des charges verticales permettant une réaction quasi égale de la part de l'emprunt granulaire (remblai) sur les côtés. En fait, l'enveloppe constituée de matériel granulaire ayant un angle de friction interne élevé, forme un effet d'arche semblable aux arches de maçonnerie et supporte ainsi une partie importante des charges verticales en présence. Ce comportement est illustré à la figure 2.9.

La rigidité diamétrale du tuyau (« *Pipe Stiffness* » ou *PS*) déterminée par l'essai de plaques parallèles (« parallel plate test », ASTM D2412, Annexe E) pourrait être utilisée pour classer les tuyaux. Ainsi,

$$PS = \frac{F}{\Delta_y} = \frac{EI}{0.149r^3} \quad (2.1)$$

où

PS = rigidité diamétrale du tuyau kN/m/m déterminée à une déflexion de 5 % du diamètre intérieur du tuyau (« *Pipe stiffness* »)

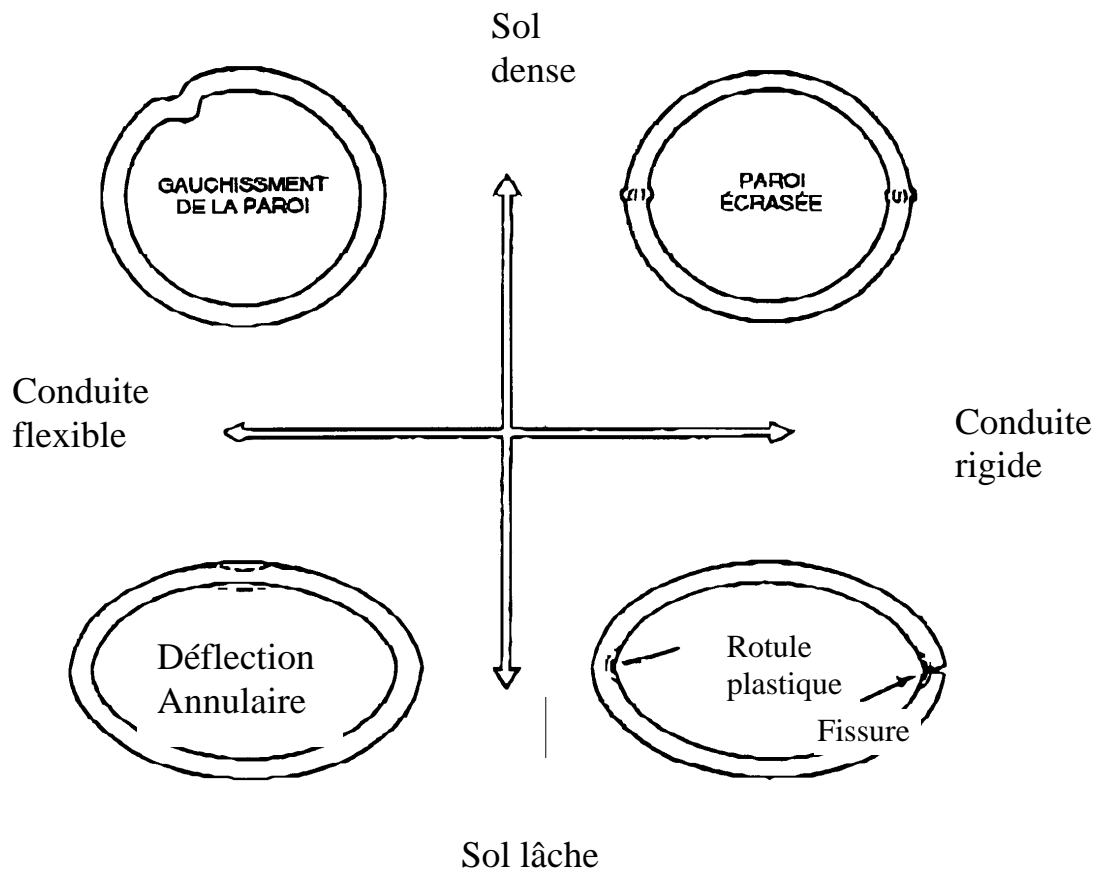
F = charge appliquée, en kN/m

Δ_y = déflexion verticale de la conduite, en mm

E = module d'élasticité du matériau du tuyau, en kPa

I = moment d'inertie par unité de longueur de la section transversale de la paroi de la conduite, en mm⁴/mm

r = rayon moyen de la conduite, en mm



**Figure 2.8 - Classification des conduites flexibles
(modifiée d'après Plastiques Big 'O' et Watkins et Reeves, 1980)**

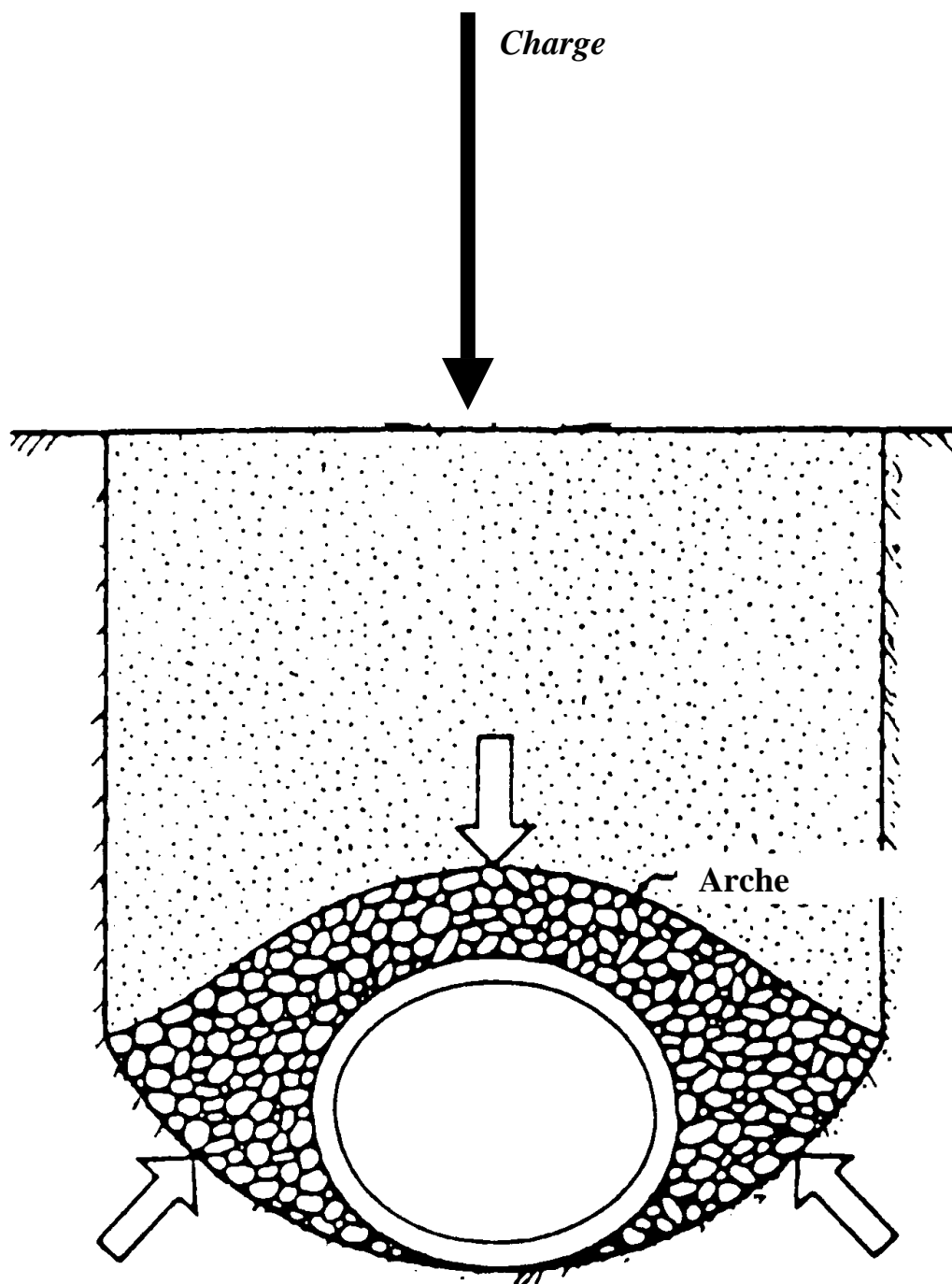


Figure 2.9 - Effet d'arche se développant dans le sol autour d'une conduite flexible (modifiée d'après Plastiques Big '0' et Watkins et Reeves, 1980)

Par ailleurs, il a été suggéré que si une conduite subit une déflexion diamétrale de plus de 2 % sans rupture, alors elle peut être considérée comme flexible (Moser, 1990). D'autres chercheurs (Burns et Richard, 1964; McGrath 1999) suggèrent que la classification soit basée sur la rigidité relative de la conduite et du sol qui l'enveloppe, S_B , donnée par :

$$S_B = \frac{M_s r^3}{EI} \quad (2.2)$$

où: M_s est le module contraint du sol et r est le rayon moyen de la conduite

Cette dernière est utilisée pour calculer le facteur d'arche VAF (*Vertical Arch Factor*) par différentes théories : éléments finis, solutions de Burns et Richard (1964), etc. Si $VAF < 1.0$, alors la conduite est dite flexible.

2.4.2 Comportement mécanique des tuyaux

Généralement, le dimensionnement des tuyaux est basé sur des contraintes et les déformations qui doivent en tout temps demeurer inférieures aux valeurs admissibles. Les valeurs admissibles sont définies par les limites de performance. Toutefois, dans le cas de conduites flexibles enfouies, c'est la déformation excessive et non la contrainte qui définit cette limite de performance. Par ailleurs, l'analyse des contraintes se fait dans les deux directions : longitudinale et transversale (radiale).

(a) Direction longitudinale

Les deux analyses de base dans la direction longitudinale concernent les contraintes axiales et les contraintes de flexion. Les contraintes axiales sont générées par des effets de température et les effets de Poisson dus aux pressions radiales. Les contraintes de flexion sont quant à elles, générées par les effets de poutre en flexion et sont déterminées en utilisant la théorie classique des poutres, en fonction des charges (poids propre + remblai + surcharges) et les points de réaction. La plupart des conduites sont conçues pour reprendre les contraintes longitudinales. Dans les tuyaux ondulés par exemple, les contraintes longitudinales sont atténuées, voire annulées, puisque ces tuyaux s'accommodent très bien à la forme du radier sur lequel ils sont installés. Aussi, compte tenu de leurs ondulations et leur flexibilité dans le sens longitudinal, ils peuvent subir des allongements et des rétrécissements sans générer des contraintes excessives.

(b) Direction radiale

L'analyse dans la direction radiale considère les contraintes, les déformations, les déflexions et la stabilité de la section normale (anneau), c'est à dire perpendiculaire à l'axe longitudinal de la conduite.

- Contraintes

Il convient de noter que l'analyse des contraintes convient mieux aux tuyaux rigides alors que celle des déformations et des déflexions est plus adaptée aux tuyaux flexibles. Les contraintes de

surface comprennent : 1. La contrainte de compression circonférentielle (ring compression), et 2. La contrainte due au moment de flexion.

Pour une section d'un anneau de tuyau (figure 2.10), la contrainte s'écrit :

$$\sigma = \frac{Pr}{A} + \frac{Mc}{I} \quad (2.3)$$

où

- P = pression radiale
- r = rayon moyen du tuyau
- A = aire de la section de la paroi par unité de longueur
- M = moment appliqué
- $\frac{I}{c}$ = module de résistance de la paroi par unité de longueur

La force de compression $T = Pr$ et le moment M dépendent de la forme du chargement de sol.

Dans le cas de tuyaux flexibles, l'Éq. (2.3) est plus utile si la contrainte de flexion (Mc/I) est écrite en terme de changement de rayon de l'anneau. La théorie de l'élasticité permet d'écrire :

$$\frac{M}{EI} = d\theta = \frac{1}{r} - \frac{1}{r'} \quad (\text{voir Fig. 2.11}).$$

L'Éq. (2.3) s'écrit alors :

$$\sigma = \frac{Pr}{A} + E.c.d\theta \quad (2.4a)$$

où

- $d\theta$ = $1/r - 1/r'$
- E = module d'élasticité de la conduite
- c = distance de l'axe neutre à la fibre la plus éloignée

Pour un tuyau lisse et uniforme (sans ondulations), L'Éq. (2.4) devient :

$$\sigma = Pm + \frac{E}{m} \frac{(r'-r)}{2r'} \quad (2.4b)$$

où

- m = r/t et représente la flexibilité de la paroi
- r = rayon moyen
- t = épaisseur de la paroi

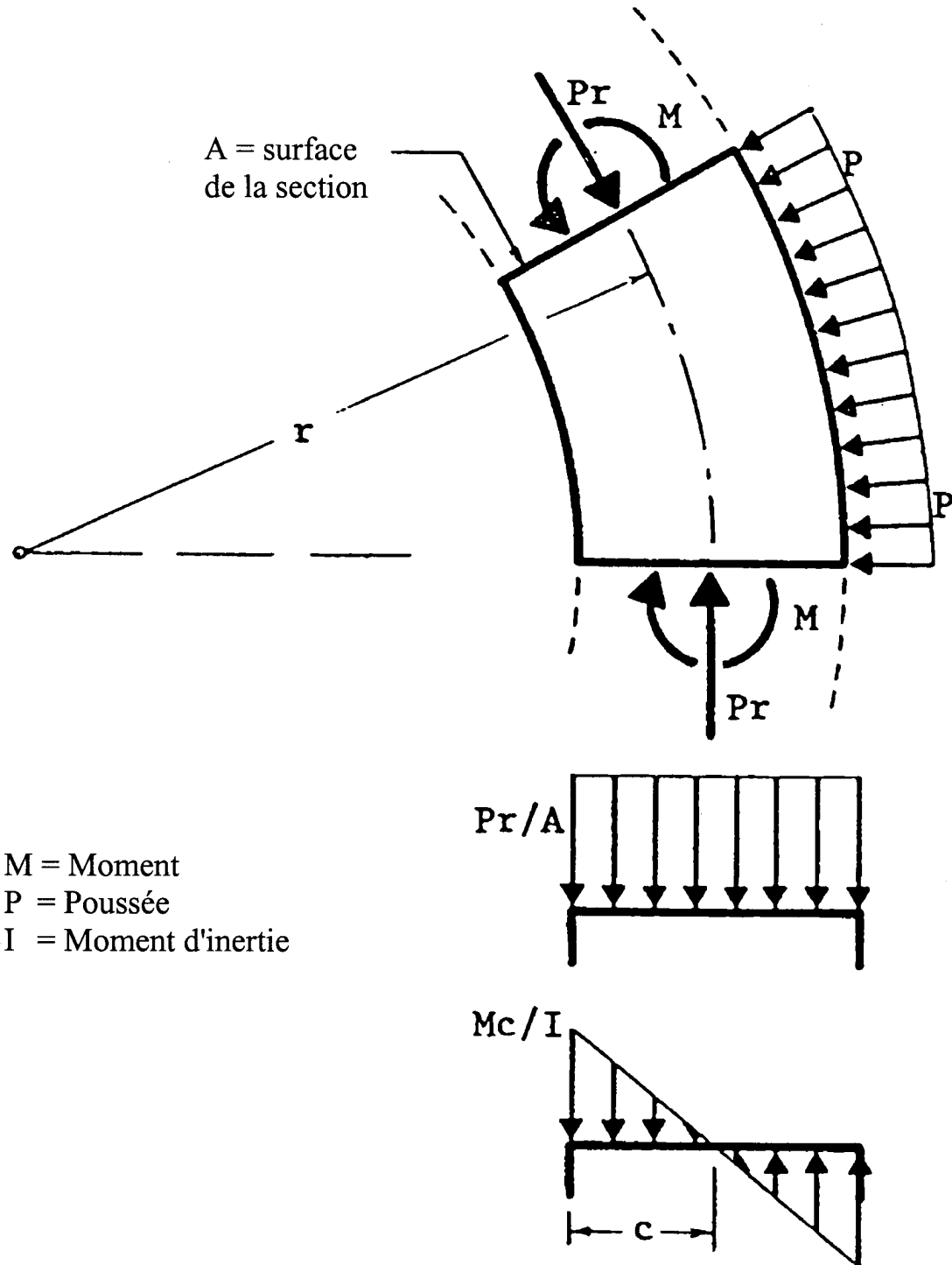


Figure 2.10 - Analyse des contraintes pour un anneau circulaire dans le sol
(modifiée d'après Watkins et Anderson, 1999)

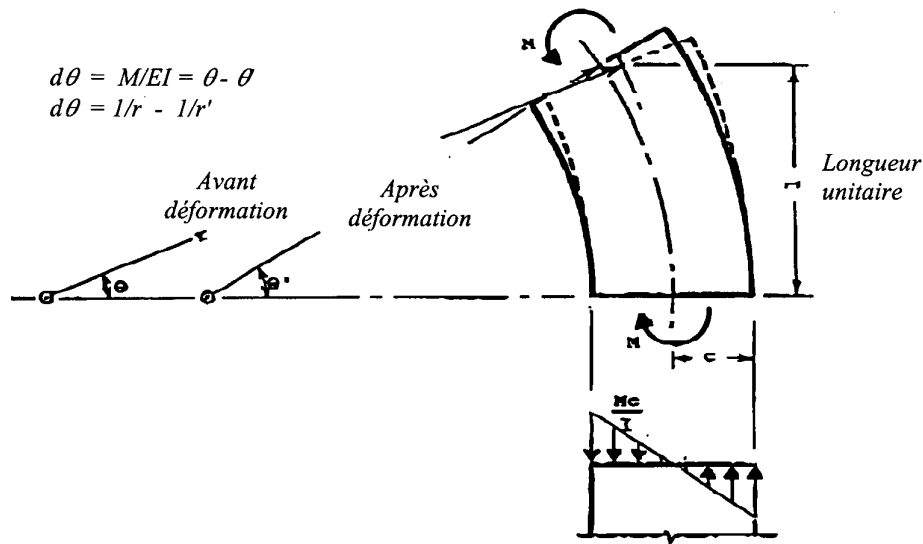


Figure 2.11 - Diagramme des corps libres pour une section infinitésimale d'anneau (modifiée d'après Watkins et Anderson, 1999)

- Déformation

Dans le domaine élastique, la déformation est $\varepsilon = \sigma/E$, soit en considérant l'Eq. (2.3)

$$\varepsilon = \frac{Pr}{AE} + cd\theta \tag{2.5a}$$

où

ε = déformation circonférencielle à la surface de la paroi du tuyau
 $d\theta$ = $1/r - 1/r'$

Dans le cas d'un tuyau lisse (sans ondulations) d'épaisseur t , l'Eq. (2.5) devient :

$$\varepsilon = \frac{Pm}{E} = \frac{(r'-r)}{2mr'} \tag{2.5b}$$

- Déflexion

Pour les tuyaux flexibles, la déflexion contrôle souvent le design. Typiquement, un tuyau flexible rond se déforme en ellipse, voir Figure 2.12. La déformée en ellipse d'un tuyau flexible entraîne une diminution du rayon de courbure en B par, $d\theta = \frac{1}{r_x} - \frac{1}{r}$. Mais de la figure 2.13, il s'ensuit,

$$r_x = \frac{r(1-d)^2}{(1+d)} \tag{2.6}$$

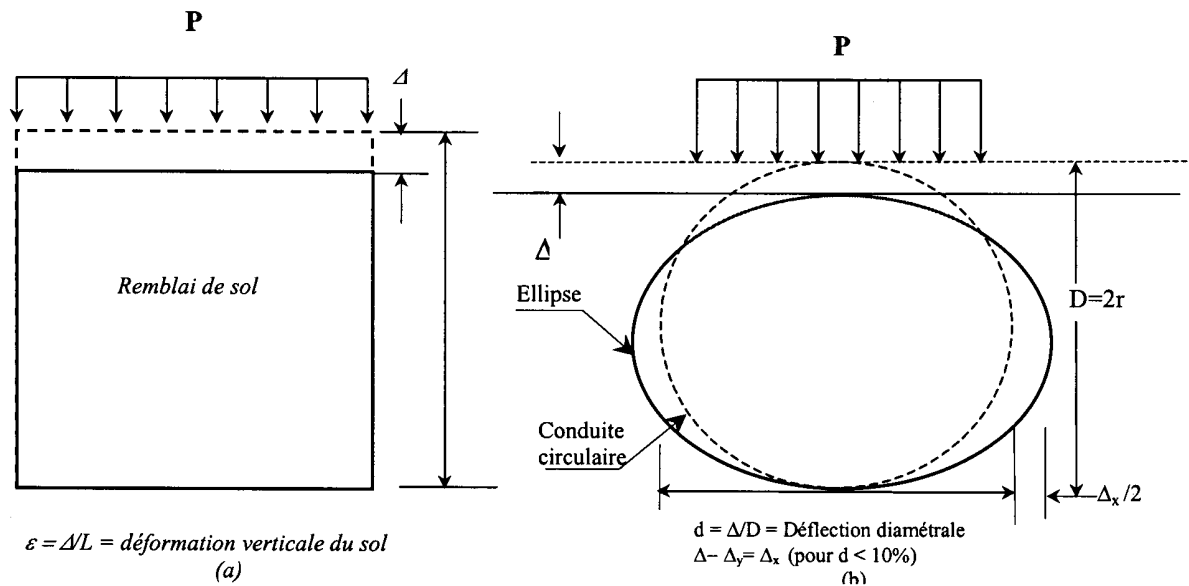


Figure 2.12 – Déflexion ellipsoïdale d'un élément de tuyau sous l'effet de la compression Axiale du sol de remblai (modifiée d'après Watkins et Anderson, 1999)

$$d = \Delta/D$$

$$a = r(1-d)$$

$$b = r(1+d)$$

$$r_x = a^2/b = r(1-d)^2/(1+d)$$

$$r_y = b^2/a = r(1+d)^2/(1-d)$$

$$r_r = r_y/r_x = [(1+d)/(1-d)]^3$$

$$A_e = \pi ab = \text{Surface intérieure de l'ellipse}$$

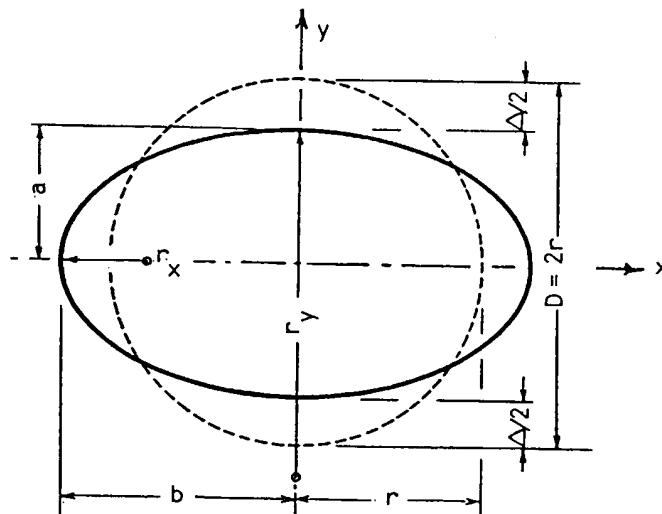


Figure 2.13 - Illustration des caractéristiques géométriques d'une ellipse en relation avec l'analyse de la déflexion d'une section de tuyau sous remblai (modifiée d'après Watkins et Anderson, 1999)

En substituant $d\theta$ dans l'Éq. (2.4a) et en négligeant les termes d'ordre supérieur de d , il s'ensuit :

$$\sigma = \frac{Pr}{A} + \left(\frac{Ec}{r}\right)(3d)(1-2d) \quad (2.7a)$$

où

$\frac{Pr}{A}$: contrainte due à la compression;

$\frac{Ec}{r}(3d)(1-2d)$: contrainte due à la déflexion

$d = \Delta/D =$ déflexion diamétrale $= \Delta_y/D = \Delta_x/D$

Dans le cas d'un tuyau lisse et uniforme d'épaisseur t , l'Éq. 2.7a, devient :

$$\sigma = Pm + \frac{3Ed}{2m(1-2d)} \quad (2.7d)$$

Il est intéressant de noter à partir de l'Éq. (2.7a) que le terme représentant la déflexion est insignifiant pour des petites valeurs de d (quand un déplacement vertical maximum est spécifié). Si la paroi du tuyau peut se plastifier sans fracture (ex. métal ou plastique), le flambement de la paroi et/ou son écrasement n'auront lieu qu'après que la contrainte de compression ait atteint sa limite élastique. L'instabilité causée par la pression extérieure quand le tuyau est dans un état de déformée s'éloignant d'une forme ronde constitue l'exception à la règle.

- Stabilité

L'instabilité implique souvent la rupture due à une pression extérieure, P (voir Fig. 2.14). Des solutions classiques sont disponibles. Par exemple, un tuyau flexible circulaire non supporté latéralement subit une rupture brusque si,

$$\frac{Pr^3(1-\nu^2)}{EI} = 3 \text{ ou } \frac{PD^3(1-\nu^2)}{EI} = 24$$

ou en négligeant l'effet de ν^2 (plus conservatrice), si

$$\frac{Pr^3}{EI} = 3 \text{ ou } \frac{PD^3}{EI} = 24$$

où

$\nu =$ coefficient de Poisson
 $Pr^3/EI =$ terme relié à la stabilité de l'anneau
 $P =$ pression critique extérieure uniforme

r	=	rayon moyen = $D/2$	
EI	=	rigidité de la paroi par unité de longueur	
EI/r^3	=	rigidité de l'anneau (<i>ring stiffness</i>)	
F/Δ	=	rigidité du tuyau (<i>pipe stiffness</i>)	
S	=	résistance	
F/Δ	=	$53.77 EI/D^3 = 6.72 EI/r^3$	(2.9)

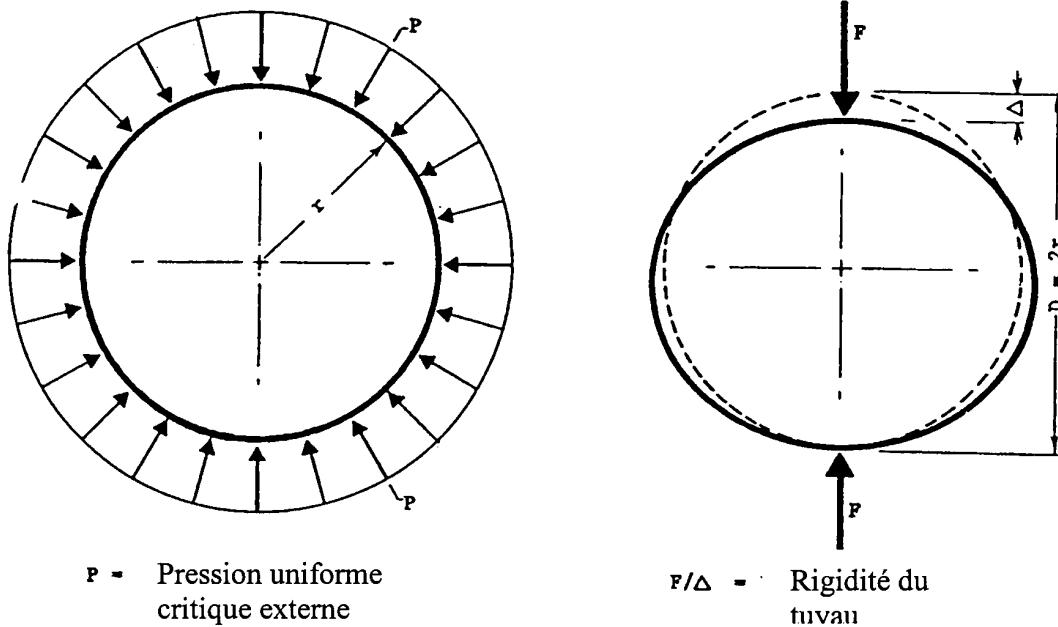


Figure 2.14 - Relation pression extérieure/déflexion - Cas d'un anneau flexible non supporté latéralement (modifiée d'après Watkins et Anderson, 1999)

Le terme F/Δ est la pente de la courbe force – déplacement diamétral à partir de l'essai de plaques parallèles (*parallel plate test*), voir figure 2.14. La rigidité de l'anneau (*ring stiffness*), EI/r^3 , représente la propriété d'un anneau circulaire de résister à la rupture causée par une pression extérieure. Elle peut être soit calculée, soit mesurée à partir de F/Δ comme suit :

$$EI/r^3 = 0.149 F/\Delta \quad (2.10)$$

2.4.3 Comportement structural d'un tuyau flexible enfoui

À mesure que se développe la pression verticale du sol (charges vives et charges mortes) sur la conduite, le sol autour du tuyau est comprimé et l'anneau flexible tend alors à se déformer selon une configuration elliptique résultant en un accroissement Δ_x de son diamètre horizontal et une réduction Δ_y de son diamètre vertical.

Un accroissement horizontal Δ_x est désirable parce qu'il permet de développer une butée latérale de la part du sol qui l'entoure. Une déflexion verticale est aussi désirable parce qu'elle permet au sol (ou emprunt granulaire) de développer un effet d'arche au-dessus de la conduite et soulager ainsi la conduite des pressions verticales excessives (Watkins et al., 1973).

L'amplitude des déformations dépend principalement de l'affaissement du sol, lequel dépend surtout des charges appliquées et de la densité et du niveau de compaction du milieu (voir figure 2.15), ainsi que de la profondeur d'enfouissement (voir figure 2.16). Les déformations (Δ_x , Δ_y) de la conduite sont certes désirables mais ne doivent pas dépasser une certaine limite, au-delà de laquelle le système ne peut plus remplir les fonctions pour lesquelles il a été conçu.

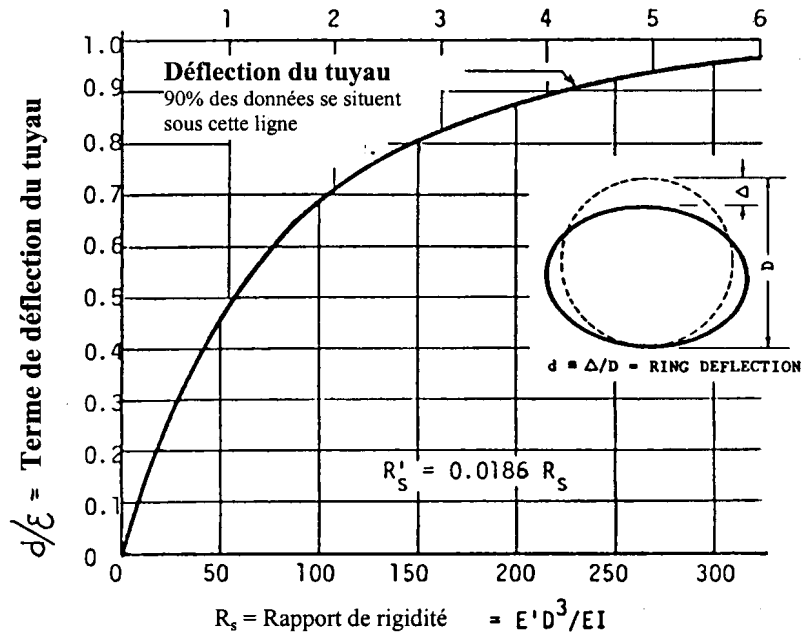
On voit bien que le sol contribue substantiellement à la résistance, si bien qu'on évoque souvent, et à très juste titre, l'interaction sol-tuyau ou le système sol-tuyau, lorsqu'on parle de tuyau flexible. Ainsi, deux facteurs sont donc importants dans la conception des tuyaux flexibles : (a) limiter le déplacement vertical diamétral, la valeur limite acceptée est de 5 % du diamètre intérieure; (b) optimiser l'emprunt granulaire quant à son type et sa densité (exprimée par le degré de compacité du sol ou pourcentage Proctor standard ou modifié).

Du point de vue structural, plusieurs diagrammes et abaques ont été développés pour aider l'ingénieur à choisir les dimensions du tuyau pour une application donnée. Partant d'une limite de déflexion, ces abaques donnent en fonction du type de l'emprunt granulaire et sa compaction, la profondeur maximale d'enfouissement. Pour des profondeurs d'enfouissement faibles où l'effet des charges vives (véhicules lourds) ne peut être négligé, des couvertures minimales empiriques requises (basées sur des essais) sont également recommandées (voir exemple, figure 2.17).

2.4.4 Aspects particuliers aux tuyaux plastiques

L'utilisation des tuyaux plastiques ne cesse de se développer, grâce notamment à leur résistance à la corrosion et à l'abrasion en milieux agressifs, à leur légèreté et à leur flexibilité qui leur permet de s'adapter au sol et former un système sol-structure efficace. Par ailleurs, ils possèdent également des propriétés uniques qui méritent d'être esquissées brièvement.

1. Sous contrainte constante, le plastique flue, c'est à dire qu'il subit des déformations graduelles en fonction du temps (voir figure 2.18). Par ailleurs, sa résistance décroît graduellement avec le temps (voir figure 2.19).
2. Sous déformation constante, il y a relaxation des contraintes jusqu'à une certaine limite (temps) au-delà de laquelle la contrainte reste constante. Par ailleurs, le taux de relaxation des contraintes est plus élevé que celui de la perte de résistance.
3. Relation contrainte-déformation, les propriétés du matériau plastique (résistance, module d'élasticité, et coefficient de Poisson) restent inchangées, même si le matériau a été soumis à des conditions de contrainte ou de déformation constante pour une longue période. Autrement dit, si après 30 années sous contrainte constante par exemple, la conduite en plastique est brusquement soumise à une charge additionnelle, la résistance disponible pour reprendre la charge est la résistance initiale du matériau vierge S_0 (voir figure 2.19). Par ailleurs, le matériau plastique possède une aptitude à « mémoriser l'historique du chargement ». Autrement dit, sous sollicitation, il tend à suivre le même cheminement (*pattern*) de contrainte que lors du premier chargement.



4.

Figure 2.15(a)

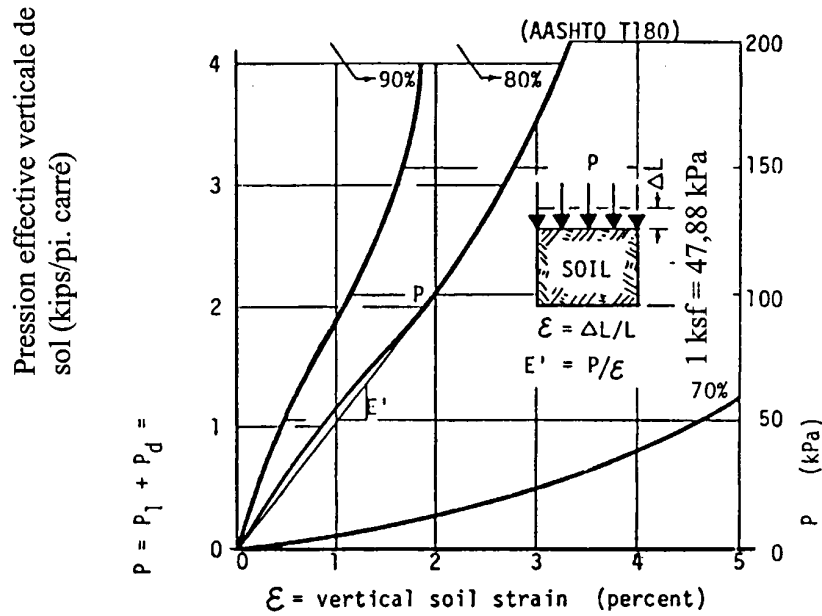


Figure 2.15(b)

Figure 2.15 - Comportement d'un tuyau enfoui en fonction de la densité du sol et du niveau de compaction : (a) Déflexion diamétrale versus rigidité et (b) Contrainte - déformation typique pour le sol non cohésif (modifiée d'après Watkins et Anderson, 1999)

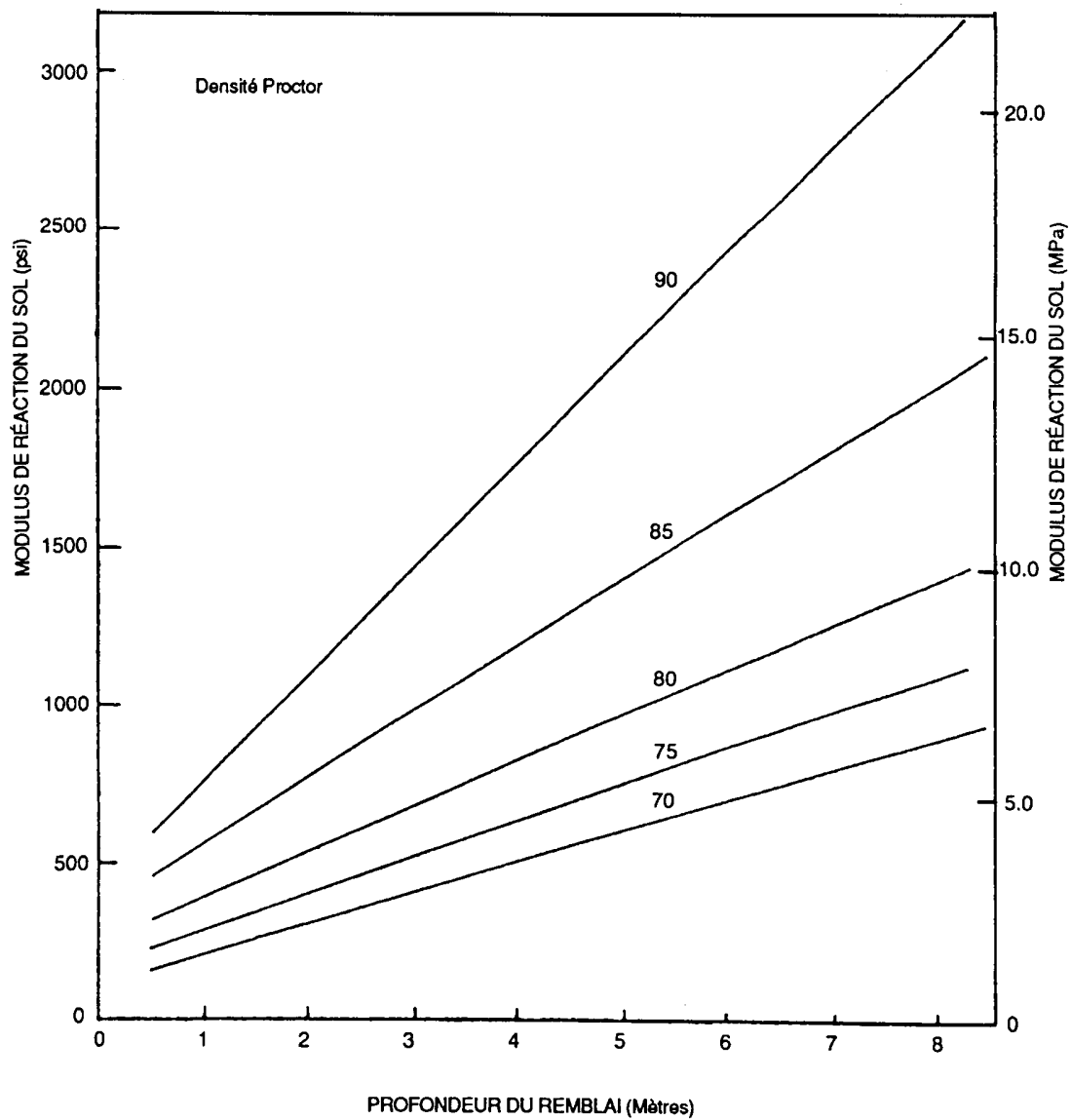


Figure 2.16 - Module de réaction du sol en fonction de la profondeur et du degré de compactage Proctor du remblai (modifiée d'après Plastiques Big 'O' et Watkins et Reeves, 1980)

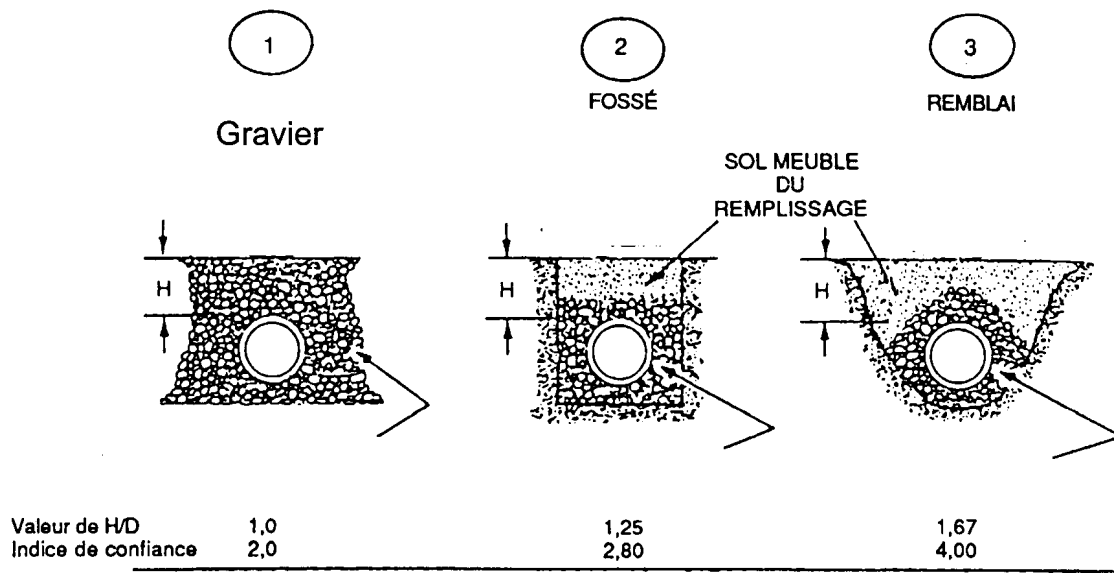


Figure 2.17 - Couverture minimale requise (rapport H/D) (modifiée d'après Plastiques Big 'O' et Watkins et Reeves, 1980)

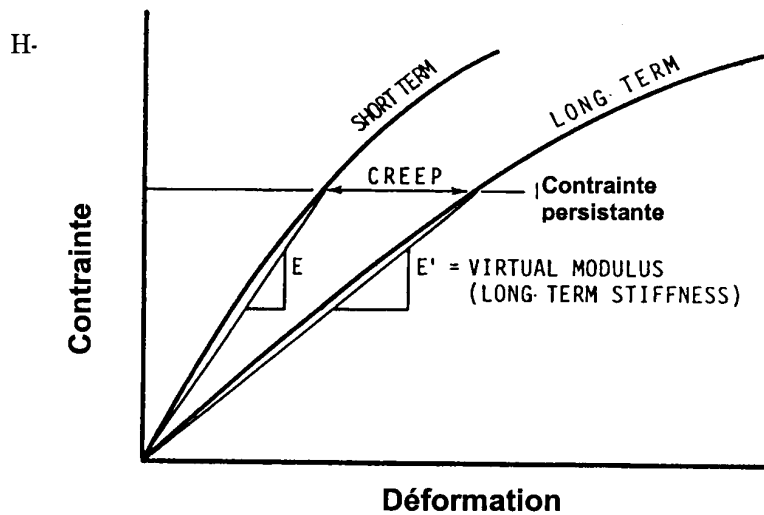


Figure 2.18 - Comportement à court terme et à long terme (fluage ou *creep*) d'une conduite (modifiée d'après Watkins et Anderson, 1999)

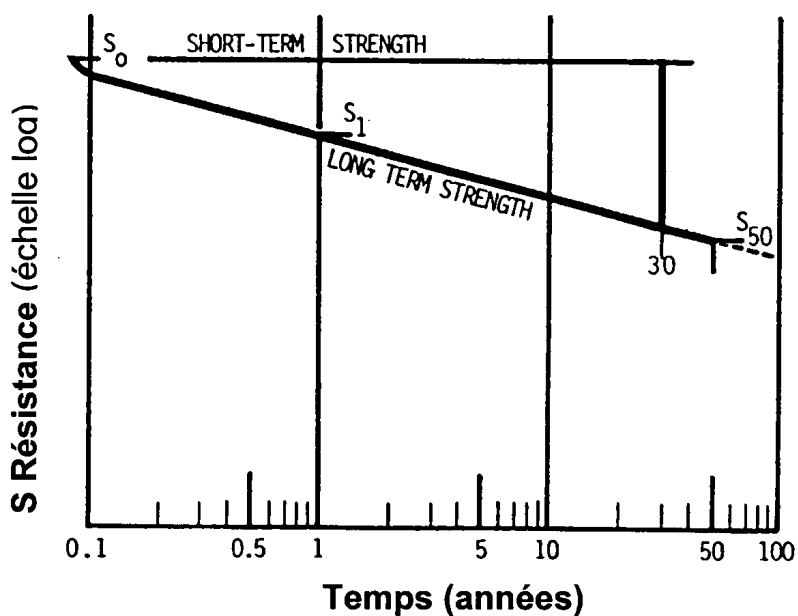


Figure 2.19 - Évolution en fonction du temps de la résistance à court terme et à long terme (modifiée d'après Watkins et Anderson, 1999)

3. PROGRAMME D'ESSAIS

3.1 Objectifs spécifiques

L'objectif général visait à étudier le comportement en chantier et en laboratoire des tuyaux en tôle d'acier ondulé galvanisé (TTAOG) et des tuyaux en polyéthylène haute densité (PEHD) utilisés comme système de protection et d'étançonnement vertical. De façon plus spécifique, le programme d'essai visait les objectifs suivants :

- Mesurer en laboratoire les déplacements d'un profilé soumis à une sollicitation transversale par plaques parallèles;
- Mesurer en chantier les déplacements d'un profilé pour différents types de sol et différents types d'excavation;
- Fournir des observations visuelles sur l'installation et le comportement en chantier des profilés circulaires;
- Reproduire, par simulation et calcul, les comportements observés en chantier et au laboratoire.

3.2 Description du programme d'essais en laboratoire

3.2.1 Généralités et objectifs des essais

Les essais en laboratoire visent à caractériser de façon sommaire les tuyaux TTAOG-36, TTAOG-60 et PEHD-36 en termes de rigidité diamétrale d'un anneau représentatif de tuyau. Cette rigidité peut être mesurée à l'aide de la méthode standardisée décrite dans la norme ASTM D2412 et l'essai de compression entre plaques rigides parallèles (parallel plate test). Cette méthode permet de déterminer la rigidité de l'anneau (EI/r^3).

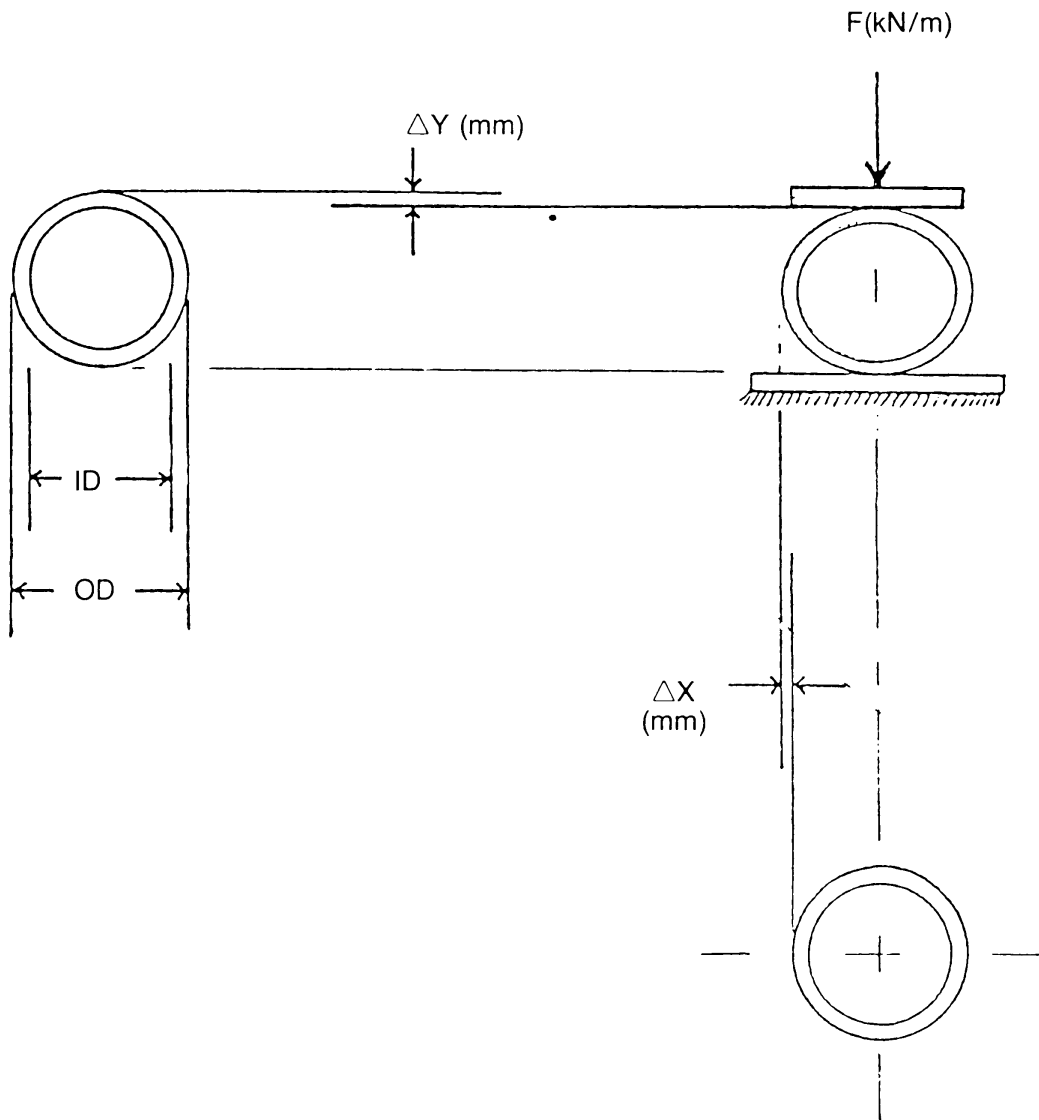
Le produit EI est appelé le facteur de rigidité de la conduite. Il peut être évalué en déterminant expérimentalement le module d'élasticité du matériel constituant la conduite et en calculant le moment d'inertie de la section transversale de la paroi de la conduite. Dans la majorité des cas, il est par contre plus facile de soumettre des échantillons représentatifs de la conduite à un essai de compression appelé aussi « épreuve de rigidité ». La valeur exacte du produit EI est alors déduite de l'une ou l'autre des formules suivantes :

$$EI = 0,149 r^3 \left(\frac{F}{\Delta_y} \right) \quad (3.1)$$

$$EI = 0,136 r^3 \left(\frac{F}{\Delta_x} \right) \quad (3.2)$$

où

Δ_y	=	la déflexion verticale de la conduite en mm
Δ_x	=	la déflexion horizontale de la conduite en mm
F	=	la charge appliquée en N/m
r	=	rayon moyen de la conduite
E	=	module d'élasticité du matériau de la conduite



$$\text{RIGIDITÉ DE LA CONDUITE} = \frac{F}{\Delta Y} \frac{\text{kN/m}}{\text{m}} \text{ OU kPa}$$

**Figure 3.1 - Croquis illustrant la rigidité de la conduite
(modifiée d'après Plastiques Big '0' et Watkins et Reeves, 1980)**

Le croquis apparaissant à la figure 3.1 illustre les termes impliqués lors de la détermination du produit EI par l'épreuve de rigidité de la conduite. L'essai consiste à placer un anneau de tuyau d'une longueur finie entre deux plaques rigides, appliquer une charge verticale de compression, et tracer la courbe charge appliquée versus déplacements vertical et horizontal (voir figure 3.1). Le taux de chargement utilisé pour les essais est de 12,7 mm/min sauf un des trois échantillons PEHD-36 qui fut testé à un taux de 1,27 mm/min pour évaluer l'effet du temps du chargement sur le comportement du tuyau en plastique.

3.2.2 Spécimens d'essai

Trois spécimens de chaque type de tuyau ont été mis à l'essai, à l'exception du TTAOG-60 où seulement deux spécimens furent testés. Avant la mise à l'essai, les spécimens ont été mesurés pour déterminer leurs diamètres intérieurs et extérieurs, leurs longueurs ainsi que l'épaisseur de leurs parois. Pour chacune des dimensions, plusieurs mesures ont été prises. Le tableau 3.1 donne les valeurs moyennes de ces mesures. À noter que les spécimens TTAOG-36 et PEHD-36, et TTAOG-60 nous ont été livrés coupés par la Ville de Longueuil et par la Ville de Victoriaville respectivement.

3.2.3 Instrumentation

Les spécimens ont été instrumentés à l'aide de LVDTs dans le sens vertical et le sens horizontal pour mesurer le déplacement vertical (rétrécissement) et le déplacement horizontal (allongement). La presse MTS 810 utilisée pour les essais est complètement asservie et est munie d'un LVDT (mesure verticale) et d'une cellule de charge permettant de suivre l'évolution des charges. Un système d'acquisition automatique de données a permis la saisie et l'enregistrement de toutes les données durant le déroulement des essais. Une vue des spécimens avant essais est présentée aux figures 3.2 (TTAOG-36), 3.3 (PEHD-36) et 3.4 (TTAOG-60).

Tableau 3.1 - Propriétés géométriques mesurées des spécimens

	TTAOG-36	PEHD-36	TTAOG-60
Ondulations	Annulaires	Hélicoïdales	Hélicoïdales
Longueur	737 mm (29 po)	705 mm (27 ³ / ₄ po)	737 mm (29 po)
Diamètre intérieur	902 mm (35 ¹ / ₂ po)	911 mm (35 ⁷ / ₈ po)	1499 mm (59 po)
Diamètre extérieur	933 mm (36 ³ / ₄ po)	975 mm (38 ³ / ₈ po)	1524 mm (60 po)
Poids unitaire	46,5 kg/m	37,7 kg/m	139,8 kg/m



Figure 3.2 - TTAOG-36 : Essai en laboratoire



Figure 3.3 - PEHD-36 : Essai en laboratoire



Figure 3.4 - TTAOG-60 : Essai en laboratoire

3.3 Description du programme d'essais en chantier

3.3.1 Programme d'essais

Les essais en chantier ont été réalisés afin d'obtenir des données et des observations sur le comportement et la performance des tuyaux à partir de conditions d'essais se rapprochant le plus possible de celles qui prévaudront lors des travaux réels en chantier. Les essais ont été effectués sur deux sites proposés par les Villes de Longueuil et de Victoriaville. Ces dernières ont également fourni la main-d'œuvre et le matériel nécessaires pour réaliser les excavations.

Les tuyaux utilisés pour les essais sont du même type que ceux utilisés par les villes-mêmes lors de leurs travaux d'excavation : des tuyaux d'un diamètre de 36 pouces en PEHD et TTAOG ont été utilisés pour les essais à Longueuil et un tuyau TTAOG, d'un diamètre de 60 pouces, a été utilisé pour les essais en chantier effectués à Victoriaville.

Deux types différents d'excavation ont été considérés : le premier type a un seul côté incliné à 45° (afin de permettre le chargement sur essentiellement un seul côté) et le second type d'excavation a les quatre parois inclinées, ce qui rend possible un chargement par compression diamétrale. Ces aspects seront discutés à la section 3.4.

Le tableau 3.2, ci-dessous, présente les éléments du programme d'essais en chantier. Cinq essais in situ au total ont été effectués. La codification des essais de chantier suivante a été utilisée :

- Les essais sont identifiés par trois caractères;
- Le premier caractère identifie la ville de l'essai (1, pour Longueuil; 2, pour Victoriaville);
- Le second caractère est un chiffre qui identifie le type de tuyau (1 : TTAOG-36; 2 : PEHD-36; 3 : TTAOG-60);
- Le troisième caractère est une lettre qui identifie le type d'excavation (A : tranchée avec un seul côté incliné; B : tranchée avec les quatre côtés inclinés, voir figures 3.5 et 3.6).

Tableau 3.2 - Description du programme d'essais en chantier

SÉRIE N°	SITE	TUYAUX	EXCAVATION	N° D'ESSAI
1	Longueuil	TTAOG 36	A	1.1.A
			B	1.1.B
		PEHD 36	B	1.2.B
2	Victoriaville	TTAOG 60	A	2.3.A
			B	2.3.B

3.3.2 Types d'excavation

Deux modes différents d'excavation ont été retenus afin de reproduire une gamme de conditions de chargement se rapprochant le plus possible des conditions de terrain. Les scénarios de rupture rapide des parois avec impact du sol sur le tuyau (donc prise en compte de l'effet inertiel) n'ont pas été considérés dans cette étude. Dans tous les essais, les tranchées expérimentales sont surexcavées afin de permettre un remblayage avec un sable moyen uniforme qui aura pour fonction d'appliquer une pression horizontale sur la paroi des tuyaux.

Le premier type d'excavation, le type A (illustré à la figure 3.5), a consisté à excaver une tranchée de forme rectangulaire dont le petit côté est un peu supérieur au diamètre du tuyau de protection et une seule des parois est inclinée à 45 degrés. Le tuyau repose verticalement sur un fond essentiellement plat. Le chargement se fait en déversant le sable sur la paroi inclinée. L'espace libre entre le tuyau et les parois verticales est rempli avec du sable. Lors du déversement, le tuyau prend son appui sur le côté vertical opposé au déversement. Ce type d'excavation cherche à reproduire un mode de chargement où le tuyau est comprimé par l'effondrement d'une seule des quatre parois de la tranchée.

Le second type d'excavation, le type B (illustré à la figure 3.6), a consisté à excaver une tranchée de forme rectangulaire dont les quatre côtés sont inclinés à 45 degrés. Le tuyau repose verticalement sur un fond plat. Le chargement se fait en déversant le sable sur les quatre parois inclinées. Le tuyau prend son appui sur le côté vertical opposé au déversement. Ce type d'excavation cherche à reproduire un mode de chargement où le tuyau est chargé par l'effondrement des quatre parois de la tranchée.

3.3.3 Localisation et description géotechnique des sites

Sites de la Ville de Longueuil

Le site suggéré par la Ville de Longueuil est situé sur un terrain vague du côté sud-ouest de l'échangeur de la route 132 menant au boulevard Roland-Therrien (figure 3.7). La topographie s'y trouve plutôt plane. Les sites pour les deux excavations (type A et type B) se trouvent sur le même terrain, à quelques mètres l'un de l'autre.

Le site de l'excavation A est constitué essentiellement d'une couche d'argile brune silteuse et sablonneuse d'une épaisseur de 1,70 m et reposant sur un sable fin à moyen saturé. La nappe phréatique se trouve à l'interface entre les deux couches, soit à une profondeur de 1,70 m.

Le site de l'excavation B est constitué essentiellement d'une couche d'argile brune silteuse et sablonneuse raide sur toute la hauteur de l'excavation (soit 2,60 m). La nappe phréatique n'a pas été observée lors des essais à cet endroit. La couche de sable n'a pas été observée à la tranchée B. L'hétérogénéité géologique du site de Longueuil s'explique par le fait qu'il est situé en bordure de l'autoroute 20 et à proximité du fleuve St-Laurent.

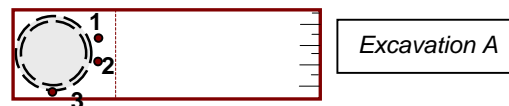
Des mesures in situ de densité ont été effectuées afin de quantifier la masse volumique du sable déversé (tranchée A) et de l'argile naturelle en place (tranchée B). Les résultats de ces mesures sont montrés au tableau 3.3. La valeur moyenne de la masse volumique totale à retenir pour les calculs est de 1 928 kg/m³. Cette moyenne découle des deux mesures effectuées dans le sable déversé devant le tuyau (essais 1 et 2). Ce sable a été placé et densifié par la rétroexcavatrice. La mesure obtenue lors du troisième essai (1 570 kg/m³) n'est pas représentative, car le sol à cet endroit a été simplement déversé pour combler l'espace entre le tuyau et la paroi de la tranchée.

Tableau 3.3 - Mesures in situ de densité

Essai n ^o	Tranchée	Type de sol	Masse volumique sèche ρ_d (kg/m ³)	Teneur en eau W (%)	Masse volumique totale ρ_{totale} (kg/m ³)
1	A	Sable*	1 685	13,1	1 906
2	A	Sable*	1 716	13,6	1 949
3	A	Sable	1 570	13,4	1 780
4	B	Argile**	1 583	25,9	1 993

* Mesure faite dans le sable déversé devant le tuyau

** Mesure faite dans le terrain argileux en place



3.3.4 Appareil de mesure de la convergence et précision

L'appareil PD 10 de HILTI est utilisé pour la mesure de convergence du diamètre interne du tuyau. Le PD 10 est un lasermètre, en l'occurrence un appareil de mesure sans contact, de cotes et de distances par laser. La portée de l'appareil dépend du pouvoir de réflexion et de l'état de surface du point de mesure. Avec des surfaces que l'on retrouve habituellement sur les chantiers, il est possible de mesurer des distances comprises entre 0,3 et 30 m. Pour mesurer des distances de 30 à 100 m, il est nécessaire d'utiliser une plaquette cible réfléchissante. La précision des mesures est établie comme suit :

- 3 mm pour chaque mesure à une température de 23°C;
- ± 5 mm pour chaque mesure à une température de 0 à + 50°C.

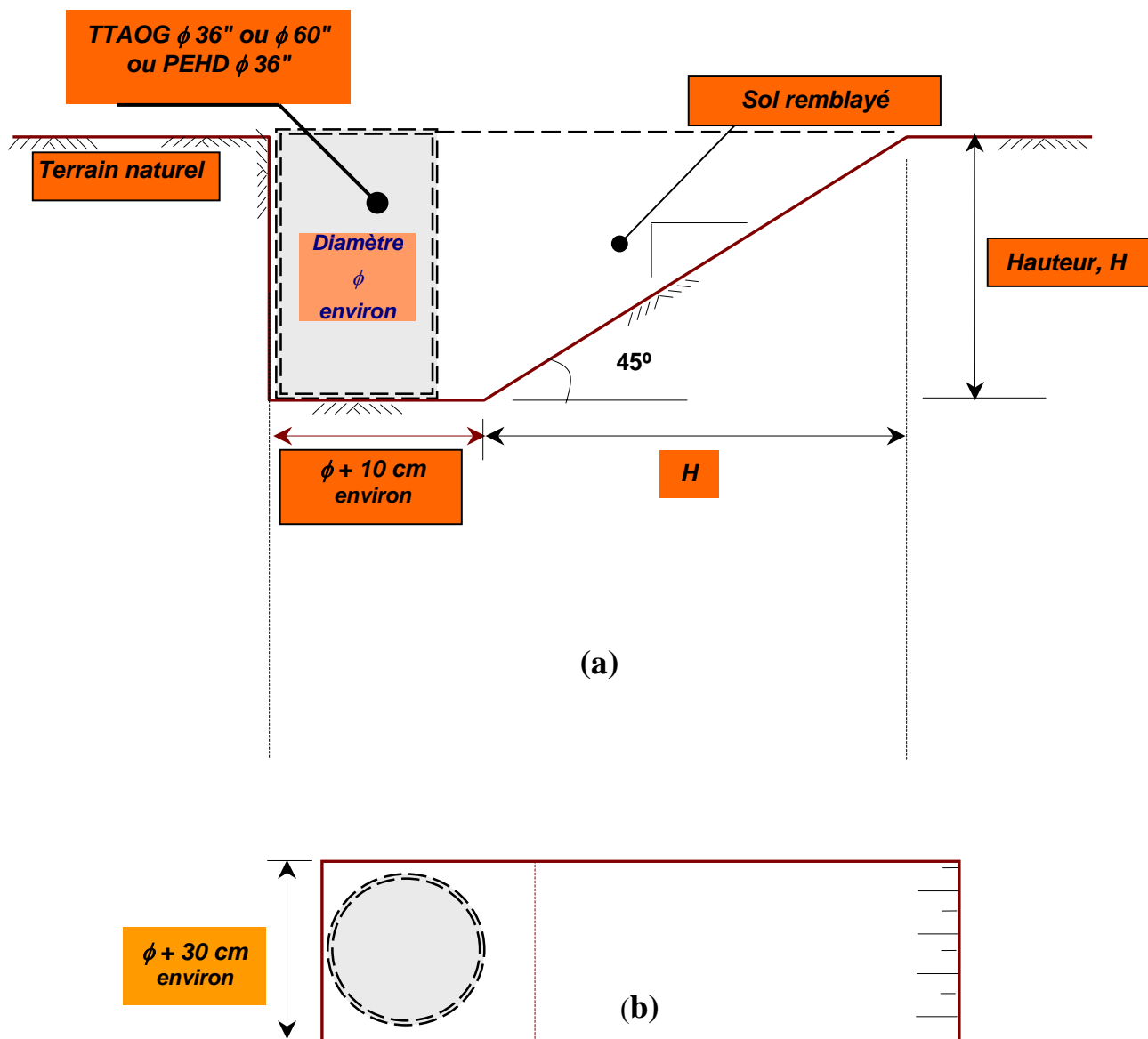


Figure 3.5 - Schéma type des excavations de type A
a) Vue en coupe; b) Vue en plan

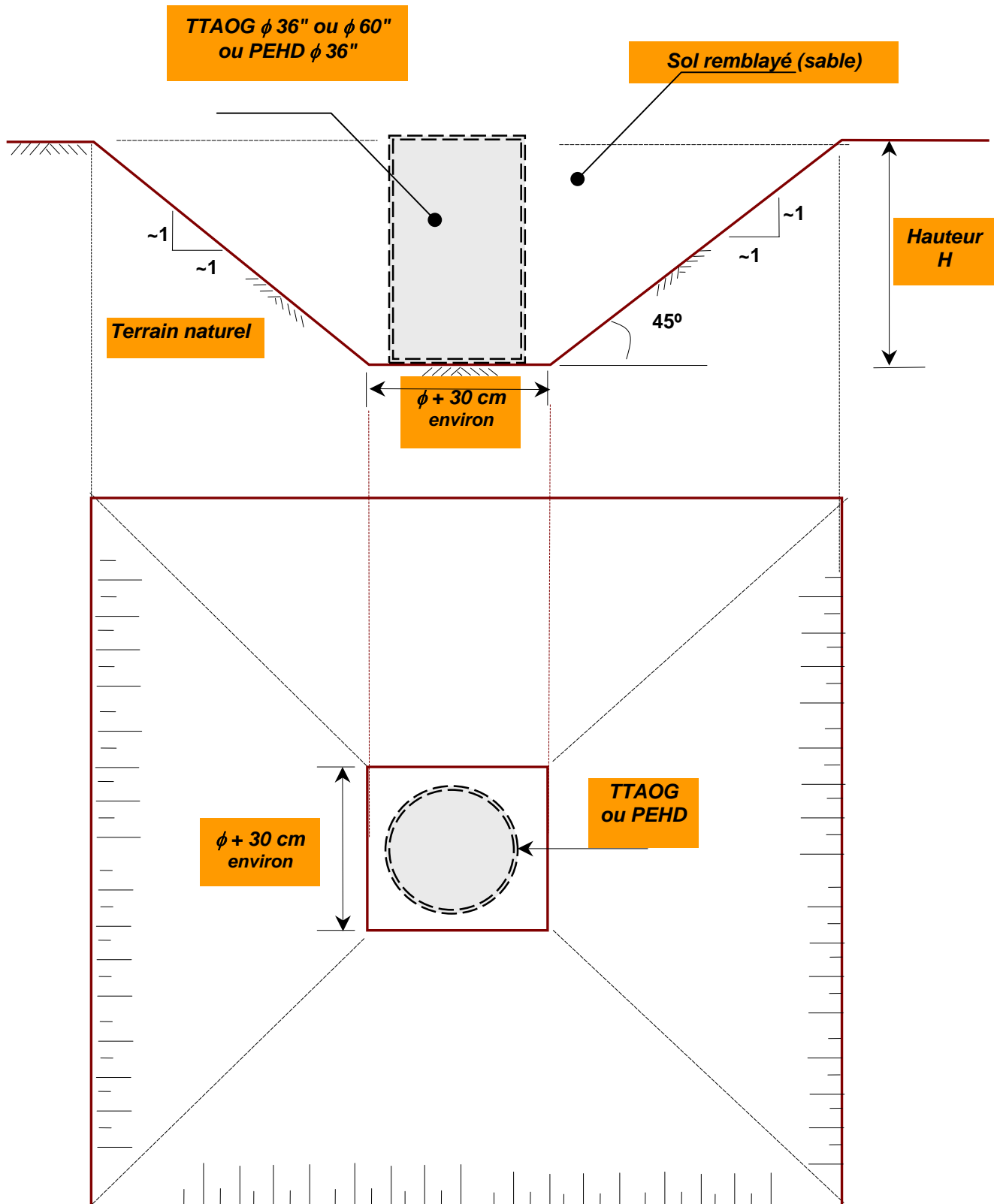


Figure 3.6 - Schéma type des excavations de type B
a) Vue en coupe; b) Vue en plan

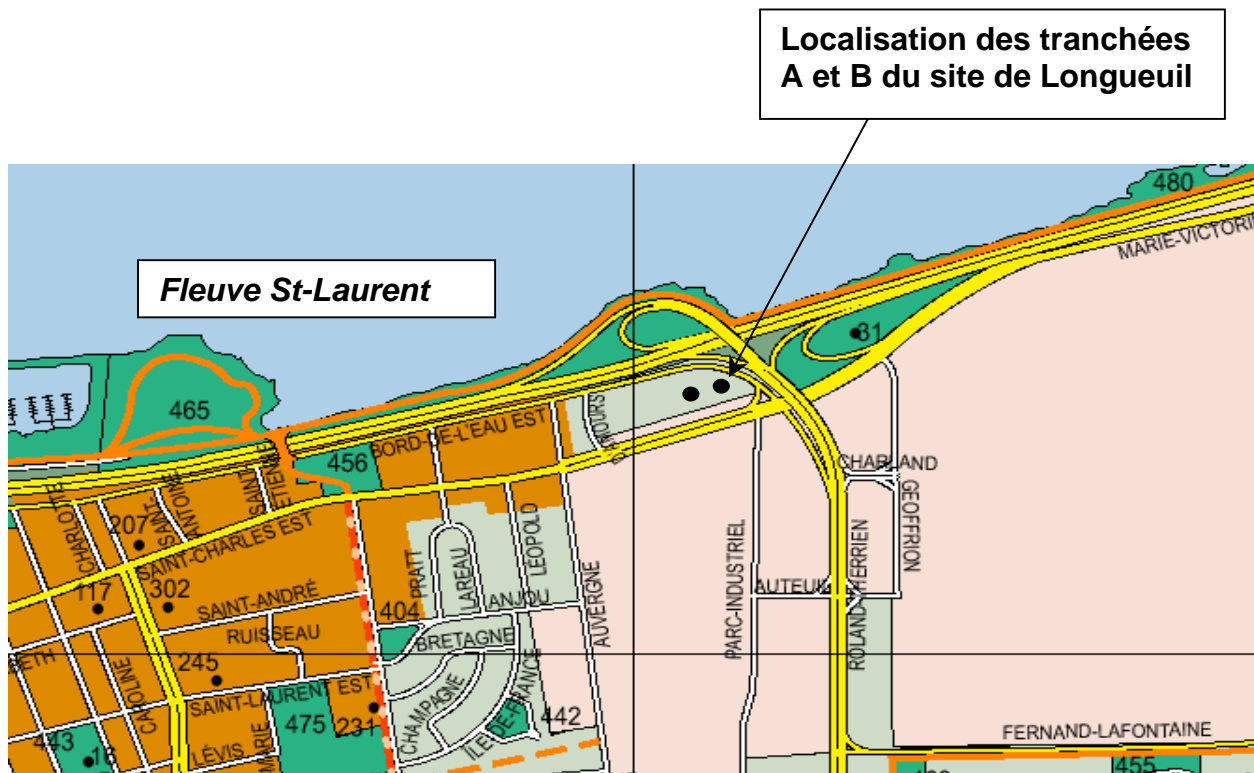


Figure 3.7 - Localisation des deux sites d'essais de la Ville de Longueuil



Figure 3.8 - Localisation du site d'essais de la Ville de Victoriaville

Site de la Ville de Victoriaville

Le site de la Ville de Victoriaville est un terrain vague situé dans le secteur industriel de la Ville (rue de l'Acadie) (figure 3.8). La topographie est plutôt plane et la nappe phréatique se trouve à une profondeur de 1,70 m. Les deux excavations ont été effectuées au même endroit compte tenu de la nature du sol (un sable fluvio-glaciaire homogène moyen à grossier).

3.4 Déroutement des essais

3.4.1 Essais en laboratoire

Les essais en laboratoire se sont déroulés durant la semaine du 11 au 15 juin 2001. Après réception des spécimens coupés à la longueur demandée, des villes de Longueuil et de Victoriaville, les spécimens ont été mesurés (voir Tableau 3.1) et instrumentés avant d'être mis à l'essai d'écrasement (*parallel plate test*). L'utilisation de la presse MTS 810 complètement asservie a grandement facilité la mise à l'essai. La longueur maximale des spécimens (29 po) a été choisie sur la base de l'espacement entre les colonnes de la MTS qui est de 30 pouces. Compte tenu de l'encombrement du TTAOG-60, du temps de préparation et de mise en place que nécessitait l'essai, il a été décidé de tester seulement deux échantillons, alors que pour les TTAOG-36 et PEHD-36, trois spécimens furent testés.

Les spécimens ont été mis à l'essai en déplacement contrôlé à un taux de 12,7 mm/min, tel que spécifié par la norme ASTM D2412, à l'exception d'un des spécimens PEHD-36 qui a été testé à un taux dix fois plus lent de 1,27 mm/min pour évaluer l'effet du fluage sur le comportement du tuyau en polyéthylène haute densité.

3.4.2 Essais en chantier

Les essais en chantier se sont déroulés le 19 juin 2001, pour la Ville de Longueuil et le 21 juin 2001 pour la Ville de Victoriaville. Le tableau 3.4 ci-dessous résume les caractéristiques de chacun des essais. Le principe suivi, pour chacun des essais, était de soumettre une section de profilé (TTAOG-36 ou 60, PEHD-36) de 2,40 m de longueur à un chargement horizontal généré par la pression des terres sur toute sa hauteur.

Un sable uniforme moyen a été utilisé pour tous les essais pour appliquer la pression des terres. Le sable était seulement déversé, placé et légèrement compacté à l'aide du godet de la pelle. Ceci a résulté en un sol de compacité faible à moyenne. Ceci nous a permis, d'une part, de s'assurer que tous les essais s'accomplissent dans des conditions les plus semblables et uniformes possibles et aussi, d'autre part, parce que c'est ce type de matériau qui développe le coefficient de poussée active (K_a) le plus élevé sur un écran enfoui dans le sol.

Tableau 3.4 - Caractéristiques générales des essais

VILLE	ESSAI	DATE	TUYAU	HAUTEUR DE L'EXCAVATION
Longueuil	1.1.A	19-06-2001	TTAOG-36	2,13 m
	1.1.B	19-06-2001	TTAOG-36	2,13 m
	1.2.B	19-06-2001	PEHD-36	2,21 m
Victoriaville	2.3.A	21-06-2001	TTAOG-60	2,34 m
	2.3.B	21-06-2001	TTAOG-60	2,34 m

Les essais en chantier 1.1.A, 1.1.B ainsi que 1.2.B à la Ville de Longueuil se sont déroulés selon les séquences suivantes :

Essai 1.1.A

- Excavation de la tranchée A (avec une paroi inclinée à 45 degrés) le 19 juin par la Ville de Longueuil (V de L) (figure 3.9);
- Transport et installation du tuyau TTAOG-36 par la Ville de Longueuil (figure 3.10 et 3.11);
- Début du remblayage par rétroexcavatrice (V de L) (figure 3.12);
- Mesures, observations et vérifications (UL et ETS);
- Mesure de densité du sol remblayé et de l'argile brune naturelle à l'aide d'un nucléodensimètre;
- Chargement avec les 4 blocs de béton (V de L) (figure 3.13);
- Extraction des tuyaux et mesure du diamètre résiduel du TTAOG.

Essai 1.1.B

- Excavation de la tranchée B (avec 4 parois inclinées à 45 - 60 degrés) le 19 juin par la Ville de Longueuil (V de L);
- Transport et installation du tuyau TTAOG-36 par la Ville de Longueuil (figure 3.14);
- Début du remblayage par rétroexcavatrice (V de L) (figures 3.15 et 3.16);
- Mesures, observations et vérifications (UL et ETS); mesure de densité du sol remblayé et de l'argile brune naturelle à l'aide d'un nucléodensimètre;
- Chargement avec les 4 blocs de béton (V de L) (figure 3.17);
- Extraction des tuyaux et mesure du diamètre résiduel du TTAOG-36 (figure 3.18).

Essai 1.2.B

- Cet essai est effectué à la tranchée B, immédiatement à la suite de l'essai 1.1.B (le 19 juin 2001);
- Transport et installation du tuyau PEHD-36 par la Ville de Longueuil;
- Début du remblayage de sable par rétroexcavatrice (figures 3.19 et 3.20);
- Mesures, observations et vérifications (UL et ETS) (figure 3.21);
- Chargement avec les 4 blocs de béton (V de L) (figure 3.22);
- Extraction des tuyaux et mesure du diamètre résiduel du PEHD-36.

Les essais en chantier 2.3.A et 2.3.B à la Ville de Victoriaville se sont déroulés le 21 juin 2001. La séquence de travaux est à peu près semblable à celle utilisée à Longueuil.

Essai 2.3.A

- Excavation de la tranchée A (avec une paroi inclinée à 45 degrés) pour le premier essai, le 21 juin par la Ville de Victoriaville (figure 3.23);
- Transport et installation du tuyau TTAOG-60 par la Ville de Victoriaville (figures. 3.24 et 3.25);
- Début du remblayage par rétroexcavatrice; utilisation du sable naturel en place (figure 3.26);
- Mesures, observations et vérifications;
- Chargement avec les 4 blocs de béton;
- Extraction des tuyaux et mesure du diamètre résiduel du TTAOG-60.

Essai 2.3.B

- Excavation de la tranchée B (par réexcavation de la tranchée A avec, cette fois-ci, les quatre parois inclinées à 45 degrés) pour le premier essai, le 21 juin par la Ville de Victoriaville;
- Transport et installation du tuyau TTAOG-60 par la Ville de Victoriaville;
- Début du remblayage par rétroexcavatrice autour du TTAOG-60;
- Mesures et observation du comportement du TTAOG sous la poussée du sable et vérifications;
- Chargement avec les 4 blocs de béton, suivi de la mesure et de l'observation du comportement (figure 3.27);
- Inondation de la tranchée sur 50 cm, suivi de la mesure et de l'observation du comportement;
- Extraction des tuyaux et mesure du diamètre résiduel du TTAOG-60.



Figure 3.9 - Essai 1.1.A : Excavation de la tranchée d'essai - 19 juin 2001



Figure 3.10 - Essai 1.1.A : Transport du TTAOG dans la tranchée d'essai - 19 juin 2001



**Figure 3.11 - Essai 1.1.A : Installation du TTAOG-36 dans la tranchée d'essai –
19 juin 2001**



(a)



(b)

Figure 3.12 - Essai 1.1.A : Remblayage de la tranchée avec du sable - 19 juin 2001



Figure 3.13 - Essai 1.1.A : Surcharge avec 4 blocs de béton posés sur le sable remblayé près du TTAOG-36 - 19 juin 2001



Figure 3.14 - Essai 1.1.B : Excavation de la tranchée B et mise en place du TTAOG-36 en fond de tranchée - Ville de Longueuil- 19 juin 2001



Figure 3.15 - Essai 1.1.B : Remblayage de la tranchée B par du sable sur 1,8 m et par l'argile brune sur 0,5 m - TTAOG-36 - Ville de Longueuil - 19 juin 2001



**Figure 3.16 - Essai 1.1.B : Fin du remblayage de la tranchée B - TTAOG-36
Ville de Longueuil**



**Figure 3.17 - Essai 1.1.B : Surcharge par des blocs posés près du TTAOG-36
Ville de Longueuil**



**Figure 3.18 - Essai 1.1.B : Extraction et observation du TTAOG-36 après le chargement
Ville de Longueuil**



**Figure 3.19 - Essai 1.2.B : Mise à l'essai du PEHD-36 dans la tranchée B
Ville de Longueuil**



Figure 3.20 - Essai 1.2.B : Remplissage de la tranchée B par du sable et du remblai - PEHD-36 Ville de Longueuil



Figure 3.21 - Essai 1.2.B : Mesure des déformations et observation du comportement PEHD-36 - Ville de Longueuil



Figure 3.22 - Essai 1.2.B : Surcharge par des blocs posés près du PEHD-36 - Ville de Longueuil



**Figure 3.23 - Essai 2.3.A : Excavation de la tranchée A (avec une paroi inclinée à 45 degrés)
Ville de Victoriaville**



**Figure 3.24 - Essai 2.3.A : Transport du TTAOG-60 dans la tranchée A
Ville de Victoriaville - 21 juin 2001**



**Figure 3.25 - Essai 2.3.A : Mise en place du TTAOG-60 dans la tranchée A
Ville de Victoriaville**



**Figure 3.26 - Essai 2.3.A : Début du remblayage autour du TTAOG-60
Ville de Victoriaville**



**Figure 3.27 - Essai 2.3.B : Début du remblayage autour du TTAOG-60
Ville de Victoriaville**

4. RÉSULTATS DES ESSAIS

4.1 Essais de laboratoire

Les essais en laboratoire ont été effectués à l'École de technologie supérieure de Montréal (ÉTS). Pour chaque type de tuyau testé, on présente les résultats suivants :

- (a) courbes force versus déplacements vertical et horizontal;
- (b) valeurs caractéristiques mesurées;
- (c) valeurs des rigidités correspondant à un déplacement vertical $\Delta_y = 5 \% D$, ou D est le diamètre interne du tuyau.

4.1.1 TTAOG-36 (Longueuil)

(a) Forces versus déplacements

Les courbes représentant la force appliquée versus déplacements pour le TTAOG-36 sont présentées à la figure 4.1. Les courbes à gauche de l'axe des ordonnées sont relatives au déplacement vertical, alors que celles à droite au déplacement horizontal. On remarque que dans le domaine élastique les courbes des trois échantillons ont la même pente. Au-delà du domaine élastique, les courbes divergent quelque peu. Ceci est attribuable au fait que les longueurs des hélices et la qualité des agrafes continues peuvent différer d'un spécimen à un autre, ce qui affecte le comportement (glissement) au-delà de la limite élastique. Pour une charge donnée, on observe que le déplacement vertical est quasiment égal au déplacement horizontal en valeur absolue.

(b) Valeurs caractéristiques mesurées

Les valeurs caractéristiques mesurées sont présentées dans le tableau 4.1. On y trouve : (a) la charge maximale par unité de longueur en kN/m et les déplacements correspondants atteints, (b) la charge par unité de longueur en kN/m et les déplacements correspondants, relatifs à la limite élastique apparente, (c) la charge par unité de longueur en kN/m et les déplacements correspondants reliés à un déplacement vertical de 5 % du diamètre nominal, c'est-à-dire $\Delta_y = 5 \% \times 900 \text{ mm} = 45 \text{ mm}$ et enfin (d) la charge par unité de longueur en kN/m sur les déplacements correspondants relatifs à un déplacement de 10 % du diamètre normal, soit $\Delta_y = 10 \% D = 90 \text{ mm}$.

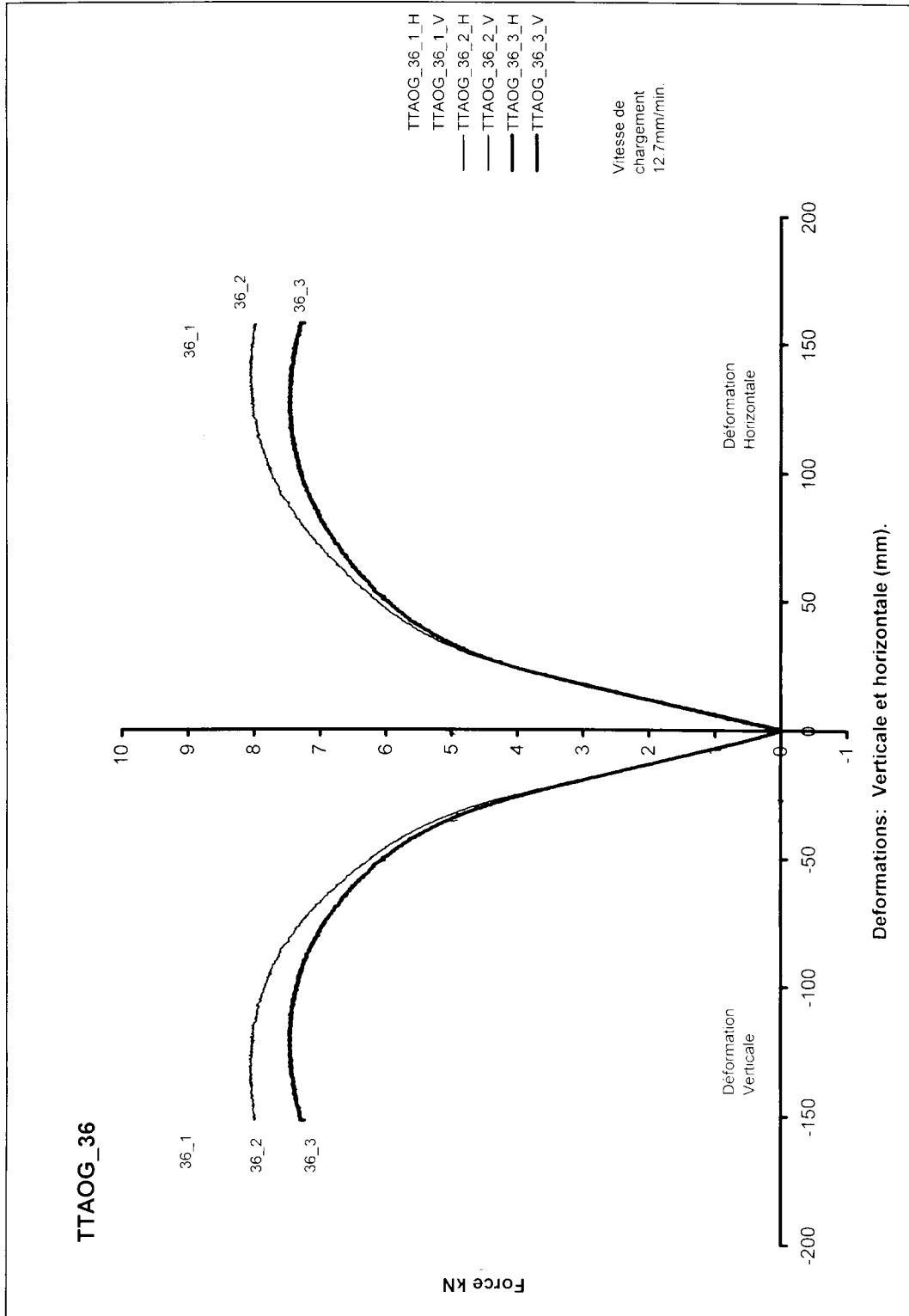


Figure 4.1 - Essais de laboratoire sur le TTAOG-36 : courbes contraintes-déformations (v = 12,7 mm/min)

Tableau 4.1 - Valeurs caractéristiques mesurées du TTAOG-36

	Spécimen	Force (kN)	Force/m kN/m	Δ_y (vert.) (mm)	Δ_x (horiz) (mm)	Δ_y / Δ_x
(a) à l'ultime	#1	8.87	12.04	152.1	141.2	1.08
	#2	8.07	10.95	136.3	142.6	0.96
	#3	7.48	10.15	122.9	129.1	0.95
	Moy.	8.14	11.05	137.1	137.6	0.99
(b) à limite élastique	#1	4.99	6.77	36.28	30.79	1.18
	#2	4.99	6.77	32.90	32.06	1.03
	#3	4.99	6.77	34.57	33.07	1.04
	Moy.	4.99	6.77	34.58	31.97	1.08
(c) à $\Delta_y = 5\%$ D	#1	5.96	8.09	45.16	39.54	1.14
	#2	5.95	8.07	45.15	45.93	0.98
	#3	5.74	7.79	45.14	45.04	1.00
	Moy.	5.88	7.98	45.15	43.50	1.04
(d) à $\Delta_y = 10\%$ D	#1	8.29	11.25	89.97	83.89	1.07
	#2	7.65	10.38	89.97	95.62	0.94
	#3	7.25	9.84	89.95	94.92	0.95
	Moy.	7.73	10.49	89.96	91.48	0.97

Longueur du spécimen = 736,71 mm (29")

La rigidité de la conduite (PS = *pipe stiffness*) est donnée par :

$$PS = \frac{F}{\Delta_y} \quad \text{en kN/m/m (kPa)} \quad (4.1)$$

et le facteur de rigidité (SF = *stiffness factor*) par :

$$SF = EI = 0.149r^3 PS \quad \text{en kPa.m}^3 \quad (4.2)$$

La rigidité (PS) et le facteur de rigidité (SF) de la conduite TTAOG-36 sont présentés dans le tableau 4.2 pour $\Delta_y = 5\%$ D et $\Delta_y = 10\%$ D.

Tableau 4.2 - Rigidité et facteur de rigidité correspondant à $\Delta_y = 5\%$ et $\Delta_y = 10\%$ (TTAOG-36)

Spécimen	Rigidité, PS (kPa)		Facteur de rigidité SF (kPa.m ³)	
	$\Delta_y = 5\%$	$\Delta_y = 10\%$	$\Delta_y = 5\%$	$\Delta_y = 10\%$
#1	179.1	125.0	2.58	1.79
#2	178.7	115.4	2.58	1.67
#3	172.6	109.4	2.48	1.57
Moy.	176.8	116.6	2.55	1.68

Note : SF calculé avec $r_{\text{moyen}} = 459$ mm (mesuré)

4.1.2 PEHD-36 (Longueuil)

(a) Forces versus déplacements

Les courbes force appliquée versus déplacements pour le PEHD-36 sont présentées à la figure 4.2. Les courbes à gauche de l'axe des ordonnées sont relatives au déplacement vertical, alors que celles à droite au déplacement horizontal. À noter que les courbes des spécimens #1 et #3 sont relatives à une vitesse de chargement de 12,7 mm/min (selon la norme ASTM), alors que le spécimen #2 est relatif à une vitesse 10 fois plus lente (1,27 mm/min). On remarque que les courbes des spécimens #1 et #3 sont quasi-identiques. Par ailleurs, l'effet de la vitesse de chargement sur le comportement est clairement démontré en comparant les courbes #1 et #3 avec la courbe #2 dont l'effet du fluage est apparent. Ce comportement est particulier au matériau plastique comme le PEHD, comme déjà expliqué à la section 2. Finalement, on observe que pour une charge appliquée donnée, le déplacement vertical (rétrécissement) est plus grand que le déplacement horizontal (allongement).

(b) Valeurs caractéristiques mesurées

Les valeurs caractéristiques mesurées sont présentées dans le tableau 4.3. On y trouve : (a) la charge maximale par unité de longueur en kN/m et les déplacements correspondants atteints, (b) la charge par unité de longueur en kN/m et les déplacements correspondants relatifs à la limite élastique apparente, (c) la charge par unité de longueur en kN/m et les déplacements correspondants reliés à un déplacement vertical de 5 % du diamètre nominal, c'est-à-dire $\Delta_y = 5 \% \times 900 \text{ mm} = 45 \text{ mm}$ et (d) la charge par unité de longueur en kN/m sur les déplacements correspondants relatifs à un déplacement de 10 % du diamètre normal, soit $\Delta_y = 10 \% D = 90 \text{ mm}$.

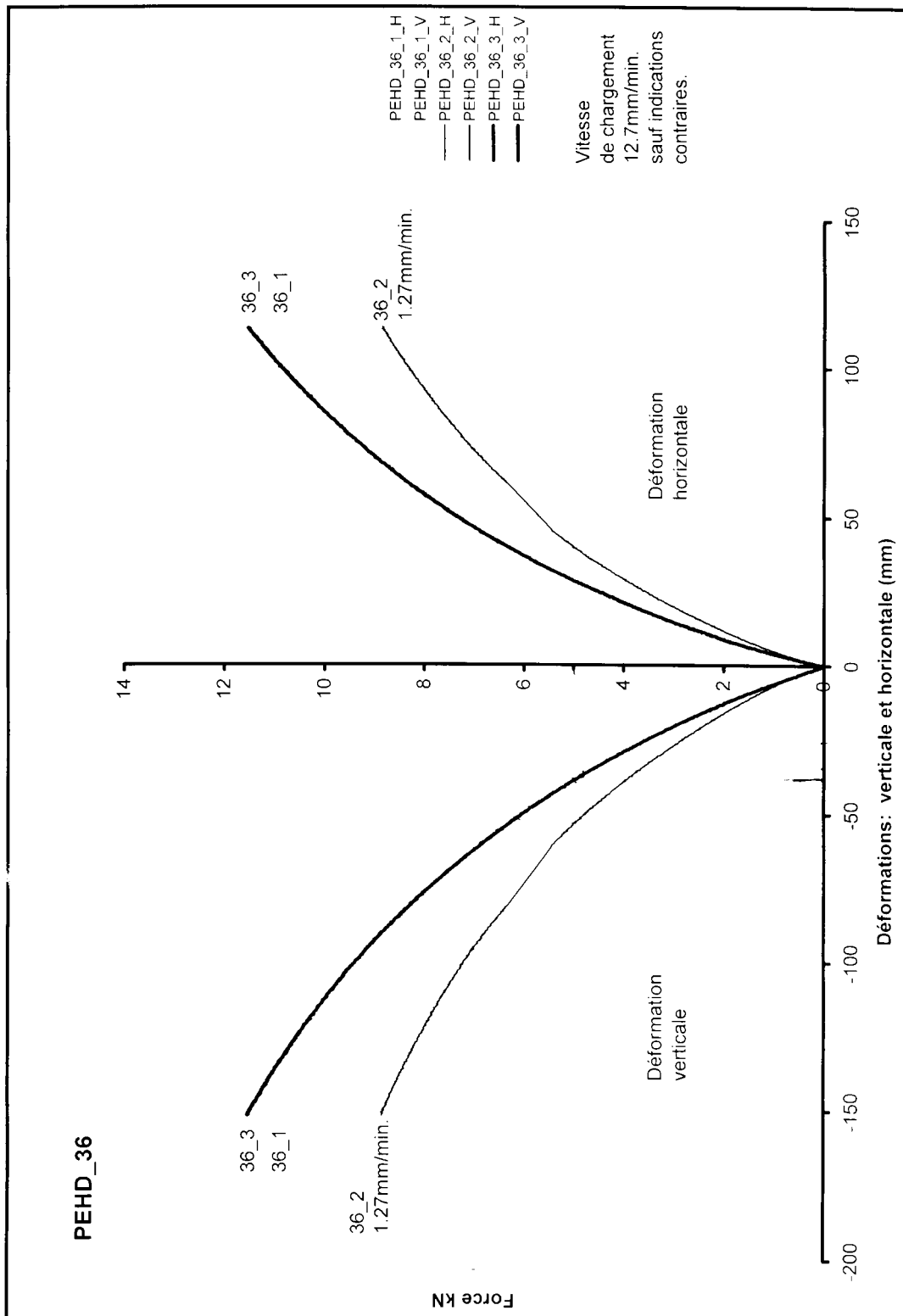


Figure 4.2 - Essais de laboratoire sur PEHD-36 : courbes contraintes-déformations (v = 12,7 mm/min)

Tableau 4.3 - Valeurs caractéristiques mesurées du PEHD-36

	Spécimen	Force (kN)	Force/m kN/m	Δ_y (vert.) (mm)	Δ_x horiz) (mm)	Δ_y / Δ_x
(a) à l'ultime	#1	11.18	15.86	151.7	113.9	1.33
	#3	11.54	16.37	151.6	113.1	1.34
	Moy. ^(b)	10.53	14.94	151.33	113.33	1.33
	#2 ^(a)	8.86	12.57	150.7	113.0	1.33
(b) à limite élastique	#1	5.50	7.80	42.46	32.03	1.32
	#3	5.48	7.77	44.00	32.37	1.36
	Moy. ^(b)	5.49	7.78	43.23	32.70	1.34
	#2 ^(a)	5.48	7.77	61.28	45.88	1.33
(c) à $\Delta_y = 5 \% D$	#1	5.70	8.08	45.0	33.90	1.33
	#3	5.59	7.93	45.07	33.16	1.36
	Moy. ^(b)	5.64	8.00	45.04	33.53	1.34
	#2 ^(a)	4.45	6.31	44.94	33.30	1.35
(d) à $\Delta_x = 10 \% D$	#1	8.73	12.38	90.02	68.41	1.32
	#3	8.84	12.54	90.09	67.74	1.33
	Moy. ^(b)	8.79	12.46	90.06	68.08	1.33
	#2 ^(a)	6.78	9.62	90.08	68.01	1.32

Note: (a) Vitesse de chargement = 1,27 mm/min
 (b) Moyenne des spécimens #1 et #3 (même vitesse de chargement = 12.7 mm/min.)
 Longueur du spécimen = 705 mm (27,75")

La rigidité de la conduite (PS) et le facteur de rigidité (SF), exprimés par les équations (4.1) et (4.2), sont présentés dans le tableau 4.4 pour $\Delta_y = 5 \% D$ (soit 45 mm) et $\Delta_y = 10 \% D$ (soit 90 mm).

**Tableau 4.4 - Rigidité et facteur de rigidité correspondant à
 $\Delta_y = 5 \%$ et $\Delta_y = 10 \%$ (PEHD-36)**

Spécimen	Rigidité, PS (kPa)		Facteur de rigidité SF (kPa.m ³)	
	$\Delta_y = 5\%$	$\Delta_y = 10\%$	$\Delta_y = 5\%$	$\Delta_y = 10\%$
#1	179.5	137.5	3.15	2.41
#3	175.9	139.2	3.09	2.44
Moy. ^(b)	177.7	138.4	2.42	2.43
#2 ^(a)	140.4	106.8	1.91	1.87

Notes : (a) Vitesse de chargement = 1,27 mm/min
 (b) Moyenne des spécimens #1 et #3
 (c) SF calculé avec $r_{moyen} = 490$ mm (mesuré)

4.1.3 TTAOG-60 (Victoriaville)

(a) Force versus déplacements

Les courbes représentant la force appliquée versus déplacements pour le TTAOG-60 sont présentées à la figure 4.3. Les courbes à gauche de l'axe des ordonnées sont relatives au déplacement vertical, alors que celles à droite au déplacement horizontal. On remarque qu'en général les deux spécimens se sont comportés de façon similaire. Les quelques petits écarts observés dans les courbes sont attribuables au fait que les longueurs des hélices et la qualité des agrafes continues peuvent différer d'un spécimen à un autre, ce qui occasionne des glissements différents et affecte donc le comportement au-delà de la limite élastique. Pour une charge donnée, le déplacement vertical est quasiment égal au déplacement horizontal en valeur absolue.

(b) Valeurs caractéristiques mesurées

Les valeurs caractéristiques mesurées sont présentées dans le tableau 4.5. On y trouve : (a) la charge maximale par unité de longueur en kN/m et les déplacements correspondants atteints, (b) la charge par unité de longueur en kN/m et les déplacements correspondants relatifs à la limite élastique apparente, (c) la charge par unité de longueur en kN/m et les déplacements correspondants reliés à un déplacement vertical de 5 % du diamètre nominal, c'est à dire $\Delta_y = 5 \% \times 1500 \text{ mm} = 75 \text{ mm}$ et enfin (d) la charge par unité de longueur en kN/m sur les déplacements correspondants relatifs à un déplacement de 10 % du diamètre normal, soit $\Delta_y = 10 \% D = 90 \text{ mm}$.

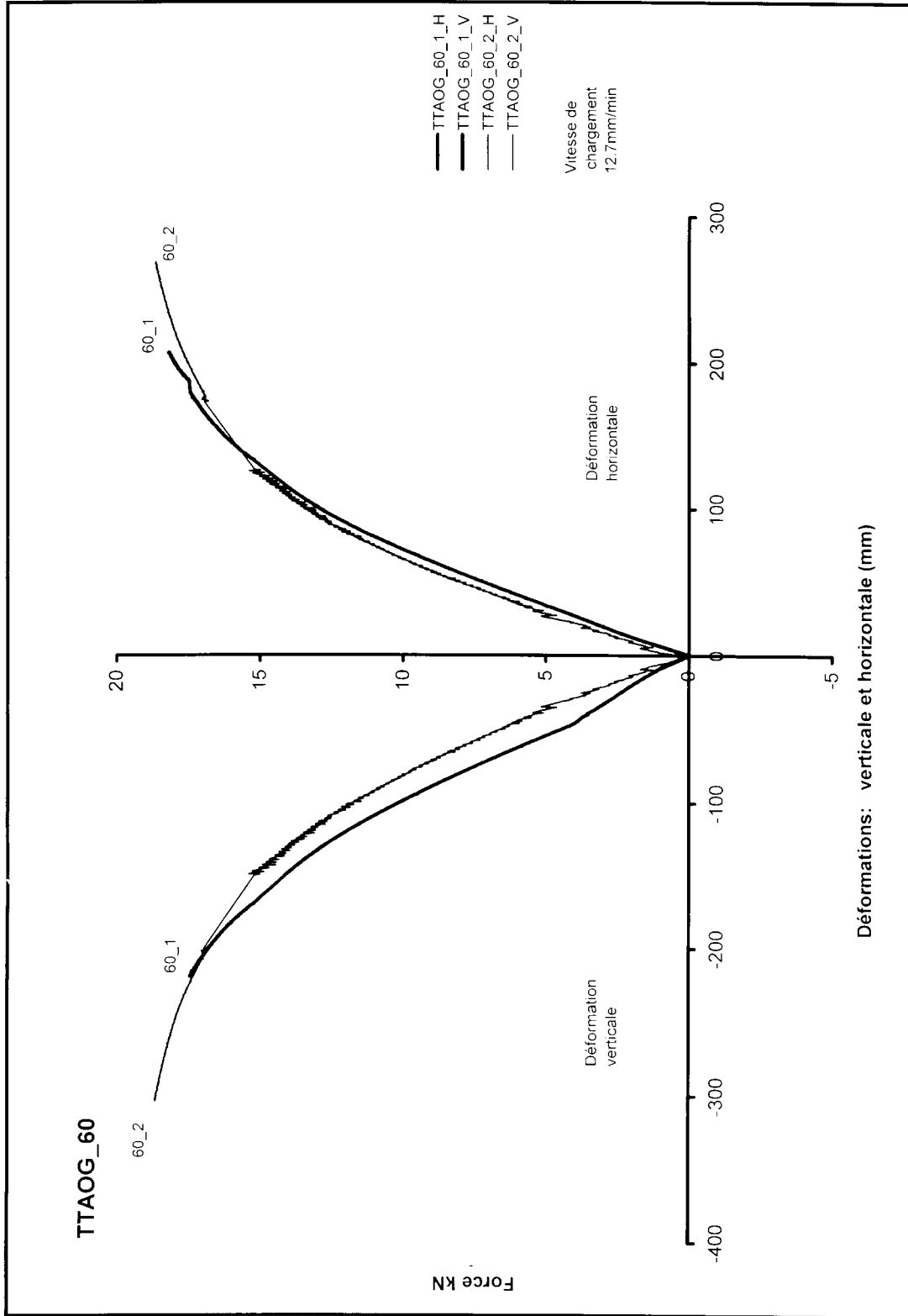


Figure 4.3 - Essais de laboratoire sur le TTAOG-60 : courbes contraintes-déformations
(v = 12,7 mm/min)

Tableau 4.5 - Valeurs caractéristiques mesurées du TTAOG-60

	Spécimen	Force (kN)	Force/m (kN/m)	Δ_y (vert.) (mm)	Δ_x (horiz) (mm)	Δ_y / Δ_x
(a) à l'ultime	#1	18.7	25.37	300	251	1.19
	#2	18.6	25.24	302	268	1.13
	Moy.	18.65	25.31	301	259.5	1.16
(b) à limite élastique	#1	12.00	16.28	119.80	90.09	1.33
	#2	12.01	16.29	102.55	83.64	1.23
	Moy.	12.00	16.29	111.18	86.87	1.28
(c) à $\Delta_y = 5 \% D$	#1	7.48	10.15	74.99	51.63	1.45
	#2	9.35	12.69	75.07	60.03	1.25
	Moy.	8.42	11.42	75.07	55.83	1.35
(d) à $\Delta_x = 10 \% D$	#1	14.16	19.21	150.04	116.35	1.29
	#2	15.27	20.72	150.11	127.30	1.18
	Moy.	14.72	19.97	150.08	121.83	1.24

Longueur du spécimen = 737 mm (29").

La rigidité de la conduite (PS) et le facteur de rigidité (SF), exprimés par les équations (4.1) et (4.2), sont présentés dans le tableau 4.6 pour $\Delta_y = 5 \% D$ (soit 75 mm) et $\Delta_y = 10 \% D$ (soit 150 mm).

Tableau 4.6 - Rigidité et facteur de rigidité correspondant à $\Delta_y = 5 \%$ et $\Delta_y = 10 \%$ (TTAOG-60)

Spécimen	Rigidité, PS (kPa)		Facteur de rigidité SF (kPa.m ³)	
	$\Delta_y = 5 \%$	$\Delta_y = 10 \%$	$\Delta_y = 5 \%$	$\Delta_y = 10 \%$
#1	135.3	128.0	8.72	8.24
#2	169.0	138.0	10.88	8.89
Moy.	152.2	133	9.80	8.57

Note : SF calculé avec $r_{\text{moyen}} = 756$ mm (mesuré)

4.2 Rigidité et facteur de rigidité initiaux

La rigidité et le facteur de rigidité sont fonction de EI, c'est à dire du module d'élasticité E et du moment d'inertie de la section I, qui dans le cas d'une conduite lisse et uniforme est égale à $I = t^3/12$ par unité de longueur, où t = épaisseur de la paroi de la conduite. Toutefois, PS et SF des tuyaux ondulés considérés dans cette étude et mesurés plus haut correspondent à des déplacements Δ_y de 5 % D et de 10 % D. Or, ces quantités changent avec le niveau de déformation car le rayon de courbure change avec l'évolution de la déformée. Plus la déflexion à laquelle PS et SF sont évalués est élevée, plus les valeurs de PS et SF divergent des valeurs réelles initiales. Une façon de déterminer les valeurs initiales de PS et de EI serait d'appliquer un coefficient correcteur C comme suit :

$$PS_{(réel)} = \frac{F}{\Delta_y} C \quad (4.3)$$

$$EI_{réel} = SF_{réel} = 0.149 r^3 PS_{(réel)} \quad (4.4)$$

où

$$C = \left(1 + \frac{\Delta_y}{2D}\right)^3 \quad (4.5)$$

où D est le diamètre interne.

Le tableau 4.7 présente les valeurs moyennes de $PS_{réel}$ et $EI_{réel}$ pour les trois types de tuyau. Ces valeurs moyennes ont été calculées avec les valeurs correspondants à $\Delta_y = 5\%$ D.

Tableau 4.7 - Rigidité et facteur de rigidité réels mesurés

Type	D (mm)	C	PS _(5%) (kPa)	PS _(réel) (kPa)	EI _(5%) (kPa.m ³)	EI _(réel) (kPa.m ³)	I (mm ⁴ /mm)
TTAOG-36	902	1.077	176.8	190.4	2.55	2.75	13,78 ^(b)
PEHD-36	912	1.076	177.7	191.4	3.12	3.36	4480 ^(c)
TTAOG-60	1499	1.077	152.2	159.2	9.80	10.55	52,75 ^(b)

Notes : (a) Valeurs basées sur la moyenne des spécimens #1 et #3 testés à 12,7 mm/min
 (b) Basé sur un module d'élasticité E = 200 GPa
 (c) Basé sur un module d'élasticité E = 750 MPa (donné par le manufacturier)

4.3 Analyses des résultats d'essais de laboratoire

Sur la base des données des tableaux 4.1 à 4.7, les observations suivantes peuvent être énoncées :

- La rigidité réelle $PS_{(réel)}$ du PEHD-36 mesurée est inférieure à celle donnée par le fournisseur (191 kPa versus 320 kPa). Il s'en suit que le moment d'inertie du PEHD-36 mesuré est également inférieur à celui donné par le fournisseur (4480 mm⁴/mm versus 5793 mm⁴/mm);
- Le rapport Δ_y/Δ_x moyen correspondant à $\Delta_y = 5\%$ D est de 1,04, 1,34 et 1,35 pour les TTAOG-36, PEHD-36 et TTAOG-60 respectivement. Ces valeurs sont comparables au rapport $\Delta_y/\Delta_x = 1,49/1,36 = 1,10$ impliqué par les équations (3.1) et (3.2) et recommandées par d'autres chercheurs;
- Parmi les tuyaux utilisés par Longueuil, le PEHD-36 est le plus léger avec 37,7 kg/m, soit 90 kg pour un système de 2,4 m, comparé à 112 kg pour un TTAOG-36;
- Les charges ultimes atteintes par les tuyaux sont respectivement de 11,05 kN/m, 14,94 kN/m et 25,31 kN/m pour TTAOG-36, PEHD-36 et TTAOG-60. À $\Delta_y = 5\%$ D, les charges sont de 7,98, 8,00 et 11,42 kN/m, respectivement;
- Le déplacement (écrasement) diamétral ultime a atteint 137,1 mm (15,2 % D), 151,3 mm (16,8 % D) et 301 mm (20,1 % D) pour respectivement TTAOG-36, PEHD-36 et TTAOG-60;
- Les rigidités moyennes (*pipe stiffness*) des tuyaux TTAOG-36 et PEHD-36 relatives à un écrasement diamétral $\Delta_y = 5\%$ D sont quasi-identiques (176,8 versus 177,7 kPa). Il en est de même pour les facteurs de rigidité (EI) (2,55 versus 2,42 kPa.m³);

- Compte tenu de l'épaisseur de sa tôle, le tuyau TTAOG-60 a un facteur de rigidité EI de 3 à 4 fois plus élevé que ceux des tuyaux TTAOG-36 et PEHD-36. Par contre, sa rigidité (PS) moyenne est légèrement moindre (152,2 kPa comparés à 176,8 et 177,7 kPa);
- L'effet du temps de chargement (fluage) sur la rigidité du tuyau à base de plastique (PEHD) est clairement démontré. En effet, il y a eu une perte de rigidité (PS et EI) de 21 % et 23 % pour respectivement $\Delta_y = 5 \%$ et $\Delta_y = 10 \%$, lorsque la vitesse de chargement est 10 fois plus lente que la vitesse standard (voir tableau 4.4);
- En service, c'est-à-dire pour $\Delta_y \leq 5 \%$ D, il faut s'attendre à ce que les trois types de tuyaux se comportent de façon similaire. Ainsi, pour un chargement donné, ils subiront des déflexions quasi-identiques.

4.4 Essais en chantier

4.4.1 Essai n° 1.1.A (TAOG-36) - Ville de Longueuil

Cet essai s'est déroulé en deux étapes. Lors de la première étape, le tuyau placé verticalement au fond de la tranchée, a été soumis à l'action croissante de la poussée des terres en déversant du sable sec sur la paroi de la tranchée qui était inclinée à 45 degrés. Cette action simulait approximativement ce qui se passerait si le tuyau avait été écrasé par le glissement d'une des quatre faces de l'excavation. La seconde étape de l'essai consistait à surcharger le tuyau en posant une série de quatre blocs de béton tout près du tuyau (figure 3.13).

Les mesures effectuées sur le terrain ont, pour l'essentiel, consisté à mesurer la compression ou l'extension du tuyau sous l'action de la charge en quatre sections différentes. Les déformations diamétrales mesurées après le déversement de sable ainsi qu'après la mise en place de la surcharge sont présentées au tableau 4.8. Les blocs de béton utilisés à Longueuil pour la surcharge avaient les caractéristiques suivantes :

- Volume d'un bloc (V_{bloc}) = 0,615 m³
- Aire_{Base} = 1,115 m²
- Poids d'un bloc (W_{bloc}) = 15 kN
- Pression de contact (1 bloc) = 13,5 kPa
- Pression de contact (4 blocs) = 53,8 kPa

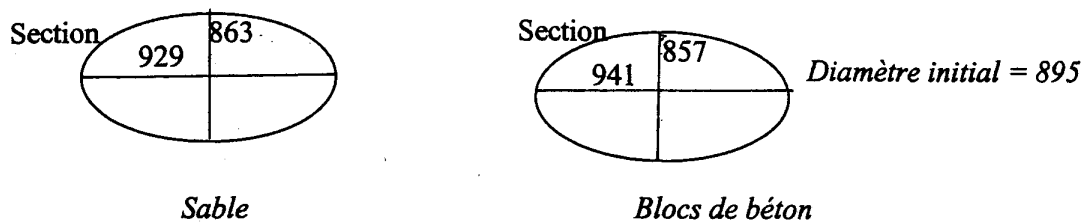
En faisant l'hypothèse que le coefficient de poussée des terres avait une valeur de l'ordre de 0,33, il est possible d'estimer, en utilisant les hypothèses de Rankine, que ces blocs auraient pu appliquer une pression horizontale d'environ 18 kPa sur un écran vertical. Cependant, il n'est pas clair que cette valeur de surcharge de 18 kPa soit immédiatement applicable à des tuyaux ondulés, compte tenu des phénomènes complexes de transfert de charge et d'interaction sol-structure en jeu. La seule façon convenable d'estimer cette pression de surcharge consisterait à modéliser tridimensionnellement le système tuyau-sol. Comme ce genre de calcul représente un exercice complexe et sort du contexte de cette étude, nous ferons l'hypothèse que cette valeur de 18 kPa s'applique au tuyau. Il faut noter que ces remarques s'appliquent également aux essais 1.1.B et 1.2.B effectués à Longueuil.

À titre d'exemple, les paramètres de contrainte suivants s'appliquent à l'essai 1.1.A à une profondeur de 2,2 m.

- Contrainte verticale, σ_v ≈ 42 kPa
- Contrainte horizontale, σ_h ≈ 14 kPa
- σ_h + surcharge de blocs ≈ 32 kPa

Il est important de réaliser que les tuyaux de TTAOG sont des conduites flexibles pour lesquelles les théories classiques de poussée des terres de Coulomb ou de Rankine ne peuvent s'appliquer sans validation préalable.

L'examen des données du tableau 4.8 montre que le comportement in situ du TTAOG est assez complexe. La compression maximale dans le tuyau relevée sous l'action du sable est de 21 mm. On observe, toutefois, un regain de 4 mm du diamètre suite à l'application des blocs de béton. La déformation nette Δ est donc de 17 mm ou 1,9 %. Le long de l'axe vertical du tuyau, la compression sous l'action du sable et des tuyaux varie entre un minimum de 7 mm au maximum de 17 mm. Il est à noter que, lors de cet essai, une ovalisation très forte mais localisée, de -32 mm et + 34 mm a été observée juste au-dessus de la section 4. Celle-ci s'est accrue de -32 à -38 mm après la mise en place de la surcharge :



Note : Dimensions en mm

4.4.2 Essai n° 1.1.B (TTAOG-36) – Ville de Longueuil

Dans cet essai, le TTAOG-36 est mis en place dans une tranchée dont les quatre parois sont inclinées à 45 degrés (tranchée de type B). Ce type de chargement permet un remblayage sur toute la périphérie du tuyau, donc l'application d'une pression uniforme. Comme pour l'essai 1.1.A, le remblayage a été suivi par l'application d'une surcharge par la mise en place de quatre blocs de béton posés près du tuyau. Ce sont les mêmes blocs que pour l'essai 1.1.A qui ont été utilisés pour la surcharge.

Les mesures de déplacements ont été prises sur cinq sections localisées à différents endroits le long de l'axe du tuyau. Les résultats sont rapportés au tableau 4.9. Les déformations les plus importantes ont été mesurées aux sections 4 et 5, soit -26 mm et -22 mm. Ces déformations sont plus élevées que celles obtenues pour l'essai 1.1.A.

Des mesures du diamètre résiduel du tuyau ont été faites environ 15 minutes après l'essai (à l'air libre). Le diamètre résiduel varie entre 881 et 901 mm dans la direction perpendiculaire au chargement et entre 901 et 914 mm dans la direction parallèle aux blocs. Ces valeurs sont très proches du diamètre initial (887 et 898 mm). Il y a donc eu un recouvrement quasi total du diamètre après l'essai.

4.4.3 Essai n° 1.2.B (PEHD-36) – Ville de Longueuil

Cet essai a essentiellement consisté à refaire l'essai 1.1.B mais en utilisant cette fois un tuyau PEHD d'un diamètre de 36 pouces (900 mm). Le déroulement de l'essai s'est fait de façon quasi identique : a) remblayage uniforme et graduel du sable, b) application d'une surcharge avec les blocs de béton.

Des mesures des déformations diamétrales ont été faites sur cinq sections différentes. Les résultats sont compilés au tableau 4.10. Les déformations sont très faibles : après la surcharge, elles varient entre un minimum de +1 mm (extension) à la section 4, à un maximum de -9 mm (compression) à la section 1, près de la surface. De façon identique au TTAOG, il y a recouvrement quasi complet des déformations après l'essai. Il n'y a donc pas eu plastification du tuyau durant l'essai.

4.4.4 Essai n° 2.3.A (TTAOG-60) – Ville de Victoriaville

L'essai 2.3.A s'est déroulé également en deux phases sur un site situé sur le boulevard Acadie, à Victoriaville. Compte tenu de la nature du terrain, un sable fin à moyen humide, le même site fut utilisé pour les deux tranchées (A et B). De même, le remblayage a été fait avec le sable en place. Les blocs de béton utilisés à Victoriaville avaient les caractéristiques suivantes :

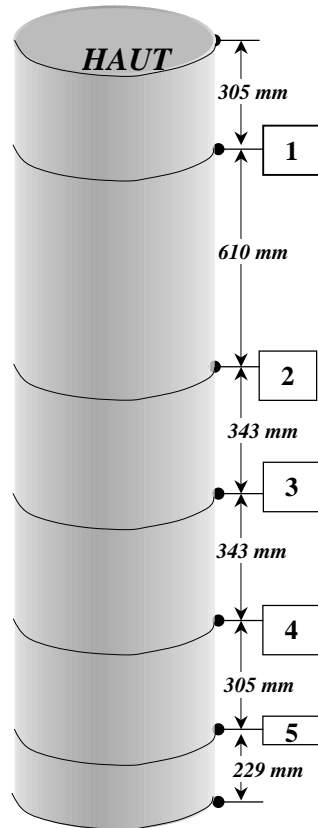
- Volume d'un bloc (V_{bloc}) = 0,443 m³
- Aire_{Base - 1 bloc} = 0,727 m²
- Poids d'un bloc (W_{bloc}) = 10,4 kN
- Pression de contact (4 blocs) = 48 k

On peut voir la disposition des blocs sur la photographie de la figure 3.27. La pression de contact totale exercée par les blocs était de 48 kPa. La surcharge horizontale est estimée à environ 16 kPa, en utilisant les hypothèses de Rankine. À une profondeur de 2,2 m, par exemple, la poussée totale des terres (incluant la surcharge) est d'environ 30 à 35 kPa. Les résultats des mesures effectuées pour l'essai 2.3.A sont regroupés au tableau 4.11. La déformation maximale atteinte par le tuyau après le déversement de sable est de 0,3 % (5 mm), au niveau de la section 4. La déformation maximale après l'application de la surcharge est de 0,7 % (10 mm), au niveau de la section 2.

4.4.5 Essai n° 2.3.B (TTAOG-60) – Ville de Victoriaville

La tranchée de type B à Victoriaville fut exécutée au même endroit que la tranchée A. Les résultats des mesures sont présentés au tableau 4.12. Les déformations radiales après le remblayage varient entre 7 et 11 mm. Le tuyau s'est légèrement comprimé après l'application de la surcharge de blocs (+2 mm).

Tableau 4.8
Essai en chantier 1.1.A
Ville de Longueuil - TTAOG-36 (900 mm)



SECTION	DIAMÈTRE INITIAL (mm)	CHARGEMENT	
		DIAMÈTRE FINAL (mm)	DIAMÈTRE FINAL (mm)
1	897	900	883
2	896	890	889
3	896	886	888
4	895	874	878
5	-	-	-

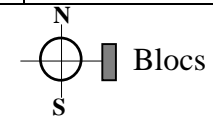
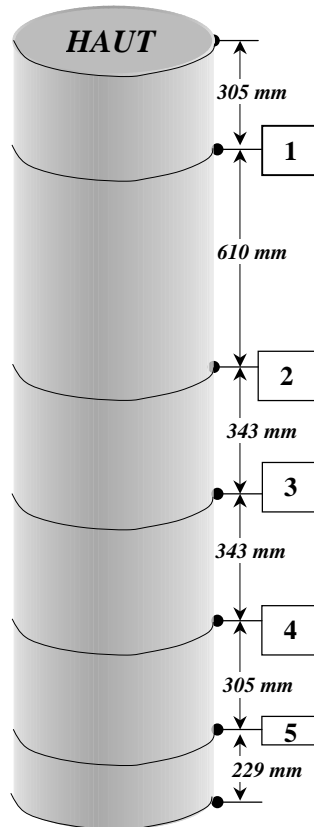


Tableau 4.9
Essai en chantier 1.1.B
Ville de Longueuil - TTAOG-36 (900 mm)



SECTION	DIAMÈTRE INITIAL (mm)	CHARGEMENT			
		SABLE		SABLE + BLOCS (Surcharge)	
		DIAMÈTRE FINAL (mm)	DIAMÈTRE FINAL (mm)	DIAMÈTRE FINAL (mm)	DIAMÈTRE FINAL (mm)
		N-S	E-O	N-S	E-O
1	898	904	870	905	883
2	895	902	876	908	879
3	892	915	870	901	877
4	887	905	865	906	861
5	896	916	915	910	874

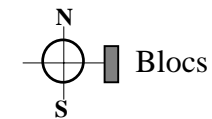
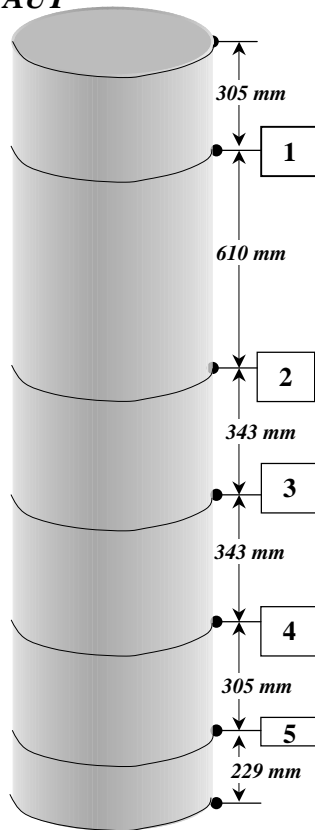


Tableau 4.10
Essai en chantier 1.2.B
Ville de Longueuil - PEHD-36 (900 mm)

HAUT



SECTION	DIAMÈTRE INITIAL (mm)	CHARGEMENT			
		SABLE		SABLE + BLOCS (Surcharge)	
		DIAMÈTRE FINAL (mm)		DIAMÈTRE FINAL (mm)	
		N-S	E-O	N-S	E-O
1	907	914	901	915	898
2	907	909	902	911	904
3	907	908	905	907	904
4	907	907	908	906	908
5	908	906	906	909	907

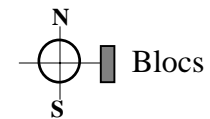
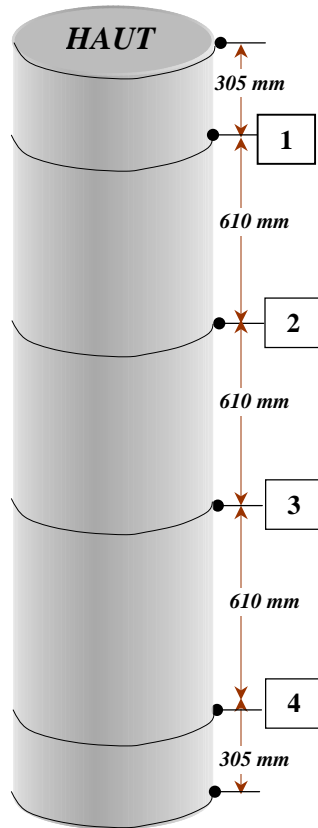


Tableau 4.11
Essai en chantier 2.3.A
Ville de Victoriaville - TTAOG-60 (1 500 mm)



SECTION	DIAMÈTRE INITIAL (mm)	CHARGEMENT	
		SABLE	SABLE + BLOCS (Surcharge)
		DIAMÈTRE FINAL (mm)	DIAMÈTRE FINAL (mm)
		E-O	E-O
1	1 499	1 495	1 488
2	1 496	1 489	1 486
3	1 493	1 491	1 486
4	1 472	1 467	1 465

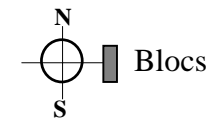
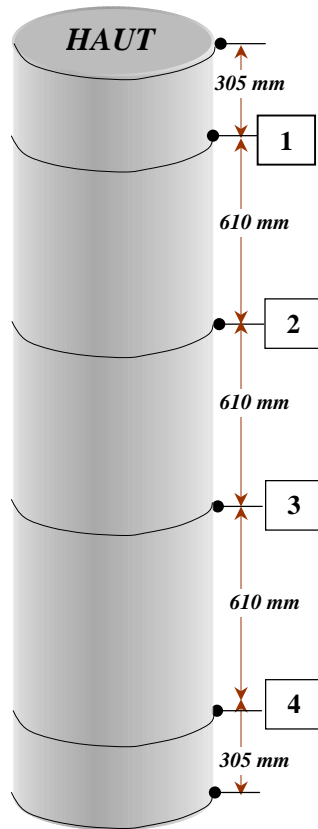
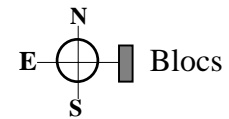


Tableau 4.12
Essai en chantier 2.3.B
Ville de Victoriaville - TTAOG-60 (1 500 mm)



SECTION	DIAMÈTRE INITIAL (mm)	CHARGEMENT		
		SABLE	SABLE + BLOCS (Surcharge)	SABLE + BLOCS + EAU
		DIAMÈTRE FINAL (mm) E-O	DIAMÈTRE FINAL (mm) E-O	DIAMÈTRE FINAL (mm) E-O
1	1 499	1 506	1 500	1 500
2	1 496	1 505	1 500	1 500
3	1 493	1 503	1 499	1 499
4	1 472	1 483	1 479	1 479



5. SIMULATIONS NUMÉRIQUES DU COMPORTEMENT DES TUYAUX

5.1 Généralités et objectifs

Ces simulations permettent d'étudier par voie numérique le comportement mécanique des tuyaux TTAOG et PEHD sous l'action de la poussée des terres. Malgré les faibles profondeurs en jeu, la complexité des phénomènes d'interaction et surtout la présence de travailleurs dans les excavations rendent ces structures critiques et imposent ainsi une évaluation complète et rigoureuse. Pour la pratique, il y a donc un besoin croissant de justification et de validation de ce type de structures. Dans ce contexte, les modèles numériques peuvent rendre de grands services, compte tenu notamment des limitations des théories analytiques classiques pour ces situations et rend possible l'étude de plusieurs scénarios à petits frais.

Les outils numériques offrent maintenant de nombreux avantages à l'ingénieur et au chercheur. Parmi ceux-ci, mentionnons que les séquences de chargement et les différentes configurations géométriques et stratigraphiques peuvent être modifiées et analysées, réduisant ainsi le nombre d'expérimentations in situ qui sont fort coûteuses. Elles permettent de valider plus facilement des outils de protection pour des situations et des contextes d'utilisation pour lesquels ils n'ont pas été conçus en premier lieu.

Ces simulations numériques visent donc, plus spécifiquement, trois objectifs :

- Déterminer la distribution des pressions autour des tuyaux TTAOG-36, TTAOG-60 et PEHD-36 pour différents modes de chargement biaxiaux représentatifs d'actions accidentelles réalistes pouvant survenir sur le terrain;
- Déterminer les déplacements verticaux et horizontaux du tuyau en contact avec le sol;
- Étudier la distribution des efforts axiaux, tranchants et de flexion se développant dans le tuyau.

5.2 Description du logiciel et des paramètres utilisés

5.2.1 Présentation du logiciel FLAC

Le code FLAC est un programme de calcul bidimensionnel développé et optimisé pour modéliser numériquement les sols, les massifs rocheux et les systèmes sols-structures. Des éléments de poutre, d'ancrage, de pieu et de câble sont disponibles dans le logiciel et rendent ainsi possible l'analyse de nombreux problèmes d'interaction sol-structure. FLAC utilise la méthode des différences finies explicites. FLAC est en développement constant depuis 1986 par la société Itasca Consulting Group, de Minneapolis, sous la direction du professeur Peter Cundall. La version 3.40 (1999) a été utilisée pour cette étude. FLAC est maintenant un des logiciels de calcul les plus utilisés en géotechnique.

Un des points forts de ce logiciel est la flexibilité qu'il offre pour la prise en compte des écoulements d'eau souterraine dans le calcul des contraintes et des déformations. Cet aspect est

spécialement déterminant dans les études de stabilité. FLAC peut également être utilisé pour le calcul d'ouvrages en terre sous sollicitations dynamiques. Il dispose également d'un langage de programmation interne (FISH) qui peut être utilisé pour faciliter l'analyse ou adapter les modèles constitutifs existants ou en développer de nouveaux.

FLAC dispose d'un préprocesseur intégré qui facilite la génération de maillage. Celui-ci doit obéir à certaines règles classiques afin d'éviter les instabilités numériques. Par exemple, il est nécessaire de raffiner le maillage au voisinage d'obstacles ou de singularités géométriques, de changements de matériaux ou dans les zones où des gradients importants de contraintes ou de potentiels sont attendus.

Les déplacements des nœuds aux frontières du modèle peuvent être contrôlés (bloqués ou non, à vitesse spécifiée ou non). Différentes combinaisons de pressions peuvent également être appliquées aux frontières du modèle. Différentes options sont possibles pour l'initialisation des contraintes et des pressions interstitielles. FLAC offre une grande flexibilité pour procéder au calcul par étapes et modéliser différents scénarios de construction ou d'excavation.

Le code FLAC incorpore un grand nombre de lois constitutives. Celles-ci peuvent être regroupées en trois catégories : nulle, élasticité, plasticité. Il est possible de modifier ou d'ajouter des lois de comportement en utilisant le langage de programmation FISH.

Les modèles disponibles dans FLAC sont : modèle nul (pour les sols retirés ou excavés), élasticité linéaire isotrope ou anisotrope, élasto-plasticité (Cam-Clay modifié, Drucker-Prager, Mohr-Coulomb standard ou avec écrouissage positif (ou négatif) et écrouissage et changements de volume, élasto-plasticité (Mohr-Coulomb) avec plan de discontinuité localisé (faille, etc.)).

5.2.2 Méthodologie de simulation avec FLAC

La figure 5.1 (adaptée du livre d'Itasca, 1998) présente les grandes lignes de la stratégie utilisée pour modéliser le comportement des fondations superficielles. La simulation se fait par phases et la réponse du système est systématiquement examinée après chacune des phases de calcul pour s'assurer de la validité des résultats.

5.3 Programme de simulations numériques

5.3.1 Problématique

Le problème qui sera analysé avec FLAC est celui d'un tuyau ondulé en contact avec un sol élastique et soumis, dans le plan horizontal, à un chargement biaxial. Ce type de chargement correspond essentiellement à l'étude de l'écrasement d'un tuyau par la pression des terres dans la direction radiale, c'est-à-dire perpendiculaire à l'axe longitudinal (vertical) du tuyau. Pour un TTAOG, le tuyau est représenté par une série d'éléments-poutres élastiques dont les caractéristiques géométriques et mécaniques seront données plus loin. On suppose que le problème est symétrique par rapport à l'axe vertical du tuyau et que des conditions de déformations planes s'appliquent.

L'analyse avec FLAC nous fournit les efforts axiaux, tranchants et de flexion dans le tuyau ainsi que les champs de contraintes et de déplacements dans le sol autour du tuyau. Dans tous les cas, le sol et le tuyau sont modélisés par une loi de comportement élastique. Ce type d'analyse ne permet pas d'étudier le développement de rotules plastiques dans le tuyau ou de plans de cisaillement dans le sol.

5.3.2 Modes de chargement

Le comportement des tuyaux sera étudié selon deux séquences ou modes de chargement. Celles-ci sont illustrées à la figure 5.2. Ces deux séquences visent à reproduire numériquement les deux types d'essais effectués sur le terrain (excavations de type A et B).

Dans la première séquence (figure 5.2.a), le tuyau s'appuie sur la face verticale de la tranchée (face opposée au déversement de sable) et le chargement se fait progressivement sur un côté du tuyau, en augmentant (par incréments successifs de 5 kPa) la pression σ_{yy} sur le sol remblayé dans la tranchée. Le modèle tient compte de l'élasticité du sol encaissant sur lequel vient s'appuyer le tuyau et le sol remblayé. Ce modèle se rapproche beaucoup des conditions réelles de terrain.

Le second mode de chargement (figure 5.2.b) consiste à écraser le tuyau dans la direction radiale en augmentant progressivement la pression sur les quatre faces du modèle par incréments successifs et égaux.

5.3.3 Programme de simulations numériques

Le tableau 5.1 ci-dessous résume l'ensemble des analyses numériques effectuées avec FLAC. Notons qu'un essai numérique sur le PEHD a été effectué dans une tranchée de type A afin de pouvoir comparer directement avec l'essai 1.1.A utilisant un TTAOG.

Tableau 5.1 - Programme des simulations numériques effectuées avec FLAC

Série	Sol de fondation	Tuyau	Simulation	Mode de chargement	Loi de comportement
1	Sable	TTAOG-60	2.3.A	I	Élastique
1	Sable	TTAOG-60	2.3.B	II	Élastique
2	Sable	TTAOG-36	1.1.A	I	Élastique
2	Sable	PEHD-36	1.1.A*	I	Élastique

* Il n'y a pas eu, sur le terrain, d'excavation de type A (tranchée rectangulaire) avec le tuyau PEHD-36.

5.3.4 Modèles FLAC

Les deux modèles FLAC utilisés dans les simulations numériques sont présentés à la figure 5.3. Pour le mode de chargement I (tranchée de type A), le modèle est symétrique par rapport à l'axe y. Par conséquent, la moitié du problème seulement requiert d'être analysée. Pour le second mode de chargement (figure 5.3.b), le modèle est symétrique par rapport aux axes y et x. Par conséquent, le quart du problème seulement requiert d'être analysé.

5.3.5 Paramètres mécaniques et géométriques du sol et des tuyaux

Les propriétés des sols et des tuyaux utilisés dans les simulations numériques sont regroupées aux tableaux 5.2 et 5.3. Toutes les analyses ont été effectuées pour des conditions de sol sec ou humide, sans la présence de la nappe phréatique.

Tableau 5.2 - Propriétés mécaniques des sols utilisés dans les simulations

N°	Sol ou matériau	E (MPa)	ν	G_s (MPa)	K_s (MPa)	ρ_{total} (kg/m ³)
1	Sable de remblayage	100	0,40	35,7	166,7	1 950
2	Sol encaissant (<i>sable et/ou gravier plus compact</i>)	200	0,30	77,0	166,7	2 040

Tableau 5.3 - Propriétés mécaniques des tuyaux utilisés dans les simulations

N°	Tuyau	E (GPa)	I (m ⁴ /m)	Aire (m ² /m)
1	TTAOG-36	200	1,38x10 ⁻⁸	0,0036
2	TTAOG-60	200	5,28x10 ⁻⁸	0,0036
3	PEHD-36	0,750	4,48x10 ⁻⁶	0,0378

Les propriétés élastiques du sol dans le logiciel FLAC sont représentées par les paramètres G et K. Le paramètre K est le module volumique du matériau et s'obtient directement à partir du module de Young (E) et du coefficient de Poisson (ν).

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$$

G est le module de cisaillement du sol et s'obtient aussi directement à partir des constantes élastiques E et ν .

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$$

5.4 Résultats des simulations numériques

5.4.1 Généralités

Cette section présente les résultats obtenus pour l'ensemble des simulations numériques des systèmes sol-tuyaux effectués en suivant les deux modes de chargement (I et II). Tel que mentionné précédemment, les modèles ont été développés dans le but de représenter les caractéristiques d'un système sol-tuyau de la façon la plus exacte possible. Dans l'approche utilisée, la géométrie complexe du système et l'interaction sol-structure sont prises en compte.

5.4.2 Simulation 2.3.A- TTAOG-60

La figure 5.4 présente le maillage, les conditions aux frontières ainsi que la contrainte $\Delta\sigma_{yy}$ appliquée sur le sable remblayé. Il faut noter que FLAC utilise les unités suivantes :

- Pression = Pascal
- Force = Newton
- Déplacement = mètre

Le chargement sur le tuyau se fait en appuyant le sable remblayé (voir la dernière ligne d'éléments), ce qui transfère ainsi la pression au tuyau TTAOG. Les points marqués par un x noir dans la figure 5.4 servent à délimiter les différentes couches de sol.

Le tuyau TTAOG-60 est modélisé explicitement par des éléments structuraux de type poutre ayant les caractéristiques données au tableau 5.3.

Le zoom sur le maillage montré à la figure 5.5 permet d'apprécier et de visualiser les 19 éléments-poutres constituant le tuyau. L'ovalisation du tuyau a été étudiée en examinant les déplacements selon deux axes du tuyau, élément (6,10) pour le déplacement horizontal et l'élément (1,14) pour le déplacement en y.

La pression totale $\Delta\sigma_{yy}$ appliquée aux éléments frontières était de 150 kPa. Toutefois, la distribution des contraintes jusqu'au tuyau a suivi un cheminement (pattern) beaucoup plus complexe. La contrainte maximale σ_{yy} , au niveau de l'élément (1,14), était de 36 kPa avec un déplacement en compression correspondant de 1,8 mm (figure 5.6). La contrainte horizontale pour l'élément (6,10) a atteint un maximum de 61 kPa pour un déplacement correspondant de 0,6 mm (figure 5.7).

La figure 5.8 permet de visualiser l'allure du maillage et du tuyau déformé et de les comparer directement au maillage initial. Cette figure présente également l'ensemble des vecteurs de déplacements pour les points nodaux de ce secteur.

La représentation des isocontours de σ_{yy} et du champ de déplacement à la figure 5.9 décrit directement le phénomène d'atténuation des contraintes à partir du point d'application et le phénomène d'« *arching* » autour du tuyau.

Les efforts internes dans le tuyau (efforts tranchants, moments, efforts axiaux) calculés par FLAC pour les 19 éléments du tuyau sont donnés au tableau 5.4.

5.4.3 Simulation 2.3.B- TTAOG-60

La figure 5.10 présente le maillage, les conditions aux frontières ainsi que la contrainte $\Delta\sigma_{yy}$ appliquée sur le sable remblayé sur toute la périphérie de la tranchée. La simplicité de ce mode de chargement rend possible l'utilisation d'un maillage plus régulier.

La pression de chargement est appliquée graduellement aux limites x et y du maillage. Encore ici, la pression maximum appliquée aux frontières était de 150 kPa. La figure 5.11 présente un

zoom permettant de bien visualiser le maillage du tuyau et d'identifier les nœuds et les éléments pour lesquels les relations contraintes-déplacements seront présentées.

La figure 5.12 présente l'évolution du déplacement vertical en fonction de σ_{yy} pour l'élément (1,20). Le déplacement du nœud (1,21) est de l'ordre de 0,8 mm (donc, un déplacement diamétral total de 1,6 mm, ce qui est la valeur qui se compare avec celles données à la section 4 (tableau 4.12).

Le déplacement horizontal et la contrainte σ_{xx} sont montrés à la figure 5.13. Le déplacement en x est inférieur à 0,1 mm. La déformée finale du tuyau superposée au maillage initial est montrée à la figure 5.14. Les déplacements sont plus marqués dans la direction y.

La figure 5.15 présente un zoom sur les déplacements et les contraintes σ_{yy} au voisinage du tuyau. C'est au voisinage des éléments-poutres 10 et 11 que les contraintes sont les plus élevées. Le tableau 5.6 présente les efforts internes calculés par FLAC. La distribution des moments le long du tuyau est montrée à la figure 5.16 tandis que la figure 5.17 représente graphiquement la distribution des efforts axiaux le long du TTAOG.

5.4.4 Simulation 1.1.A- TTAOG-36

Cet essai est à peu près identique à l'essai 2.3.A, à la différence près que le diamètre du tuyau est maintenant de 36 pouces. Les autres paramètres du modèle restent inchangés.

La figure 5.18 présente le maillage utilisé pour les calculs, de même que les conditions aux frontières et la pression de chargement. La valeur maximale de la pression de chargement atteinte était aussi de 150 kPa. La figure 5.19 présente un zoom sur le maillage du tuyau. Les figures 5.20 et 5.21 présentent les historiques de l'évolution de σ_{yy} , σ_{xx} et du déplacement pour le point nodal (1,14) en y, et pour le point nodal (5,9) en x.

La contrainte maximale atteinte par l'élément (1,13), qui est en contact direct avec le tuyau est de 53,2 kPa. Le déplacement y correspondant est de 1,6 mm. Dans la direction x, la contrainte σ_{xx} a monté jusqu'à 66,9 kPa avec un déplacement en x de 0,4 mm.

La déformée du tuyau après le chargement est bien illustrée par le graphique de la figure 5.22. La figure 5.23 présente la distribution des contraintes autour du tuyau. L'effet d'arche y est bien visible.

Les efforts internes dans le tuyau (efforts tranchants, moments, efforts axiaux) calculés par FLAC sont tabulés au tableau 5.6.

5.4.5 Simulation 1.1.A*- PEHD-36

Cet essai numérique reproduit l'essai 1.1.A mais en utilisant cette fois un tuyau en PEHD, l'objectif étant de permettre une comparaison directe des résultats.

La figure 5.24 présente le maillage utilisé pour les calculs, de même que les conditions aux frontières et la pression de chargement. La figure 5.25 présente un zoom sur le maillage du tuyau. Les figures 5.26 et 5.27 présentent les historiques de l'évolution de σ_{yy} , et de σ_{xx} , et du déplacement pour le point nodal (1,14) en y et pour le point nodal (5,9) en x.

La contrainte maximale atteinte par l'élément (1,13), qui est en contact direct avec le tuyau est de 42 kPa. Le déplacement y correspondant est de 0,42 mm. Ceci correspond à une déformation diamétrale totale de 0,5 mm, ce qui est très faible. Dans la direction x, la contrainte σ_{xx} a monté jusqu'à 55,2 kPa avec un déplacement en x de 0,4 mm.

La déformée du tuyau après le chargement est bien illustrée par le graphique de la figure 5.25. La figure 5.28 présente la distribution des contraintes autour du tuyau. Les efforts internes dans le tuyau sont présentés au tableau 5.7.

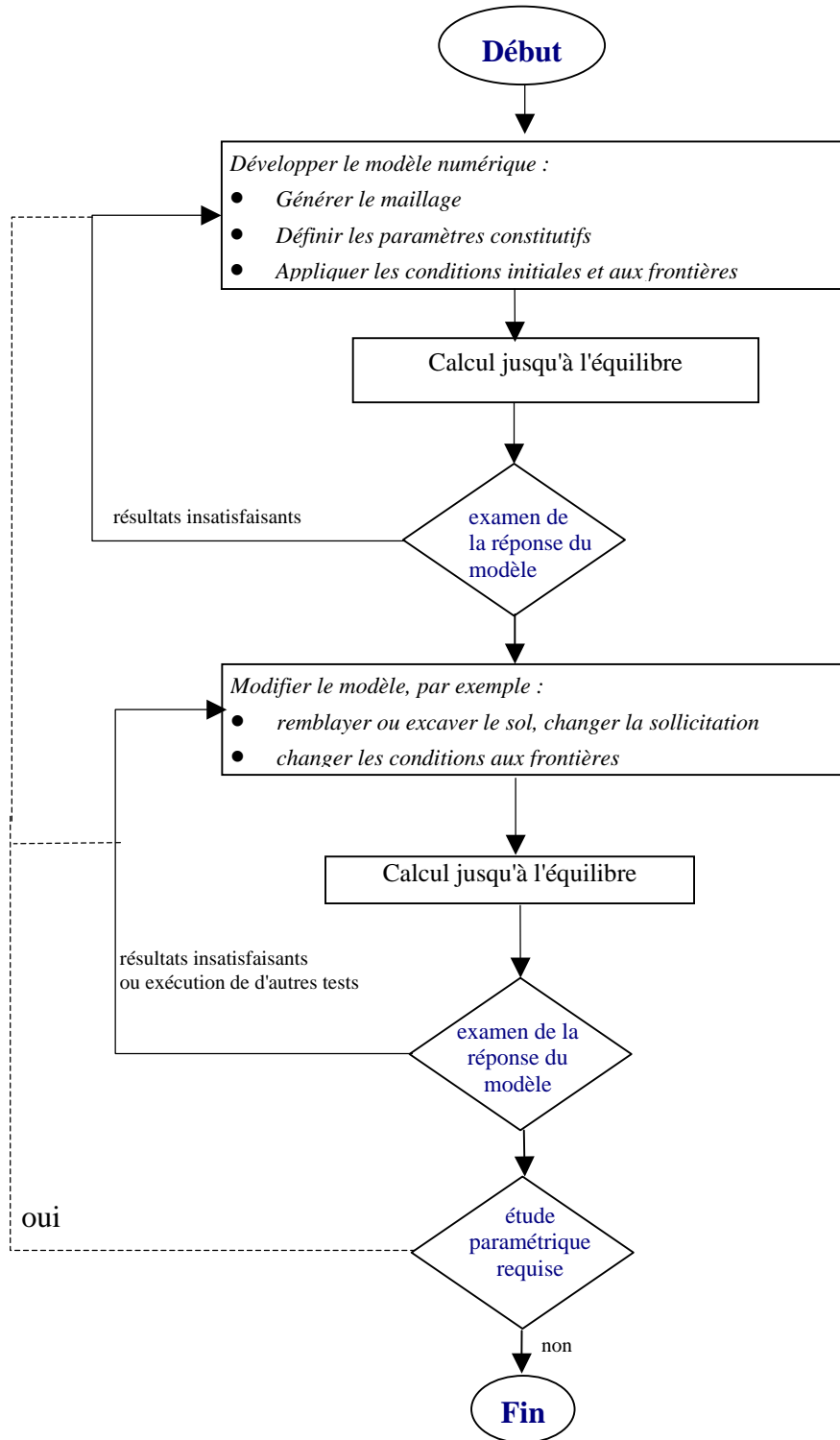
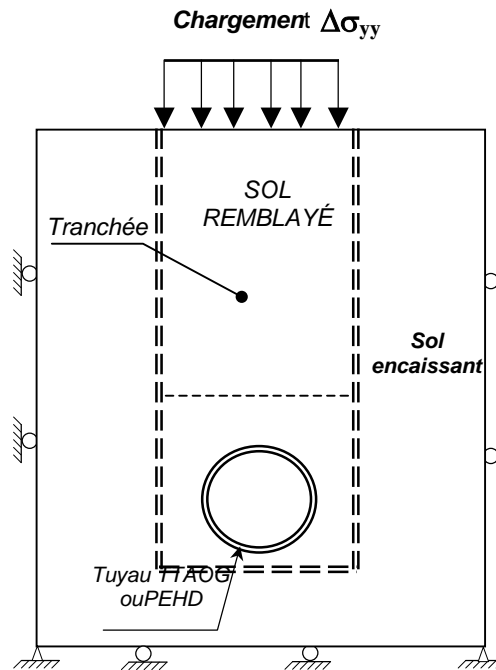


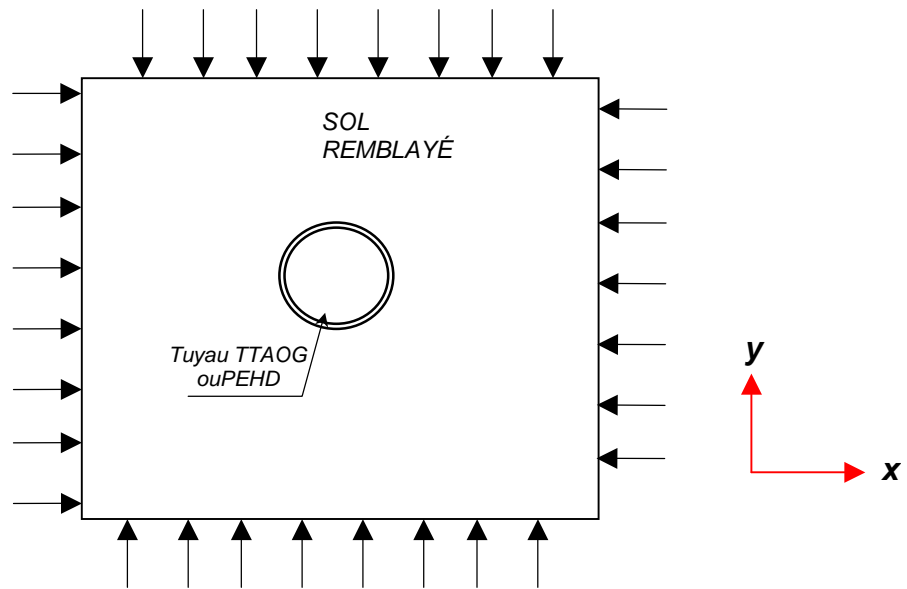
Figure 5.1 - Méthodologie de modélisation numérique avec FLAC (Itasca, 1998)

MODE DE CHARGEMENT I (Excavation de type A)



(a)

MODE DE CHARGEMENT II (Excavation de type B)



(b)

Figure 5.2 - Modes de chargement utilisés dans les simulations :
(a) tranchée de type A; b) tranchée de type B

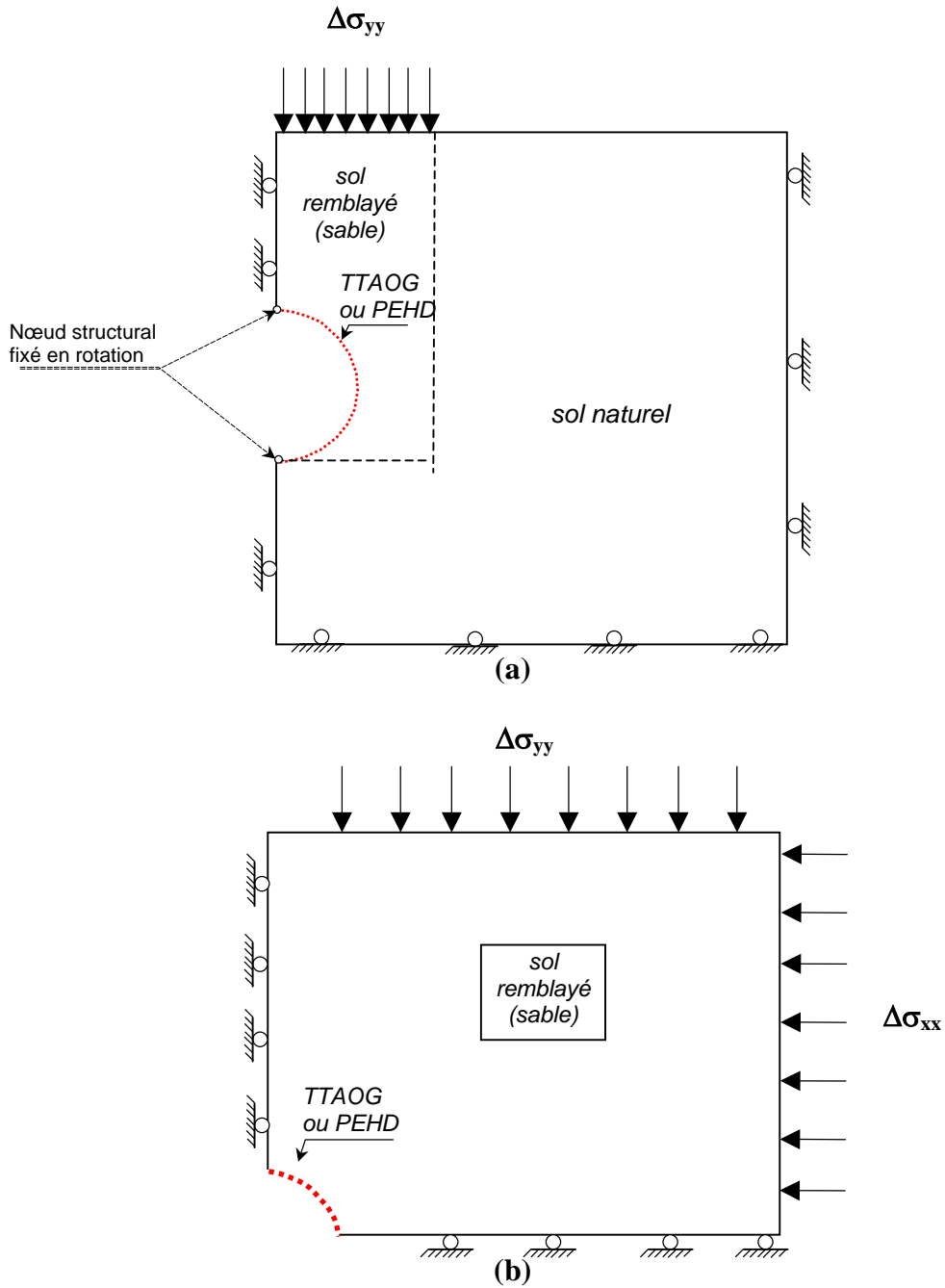
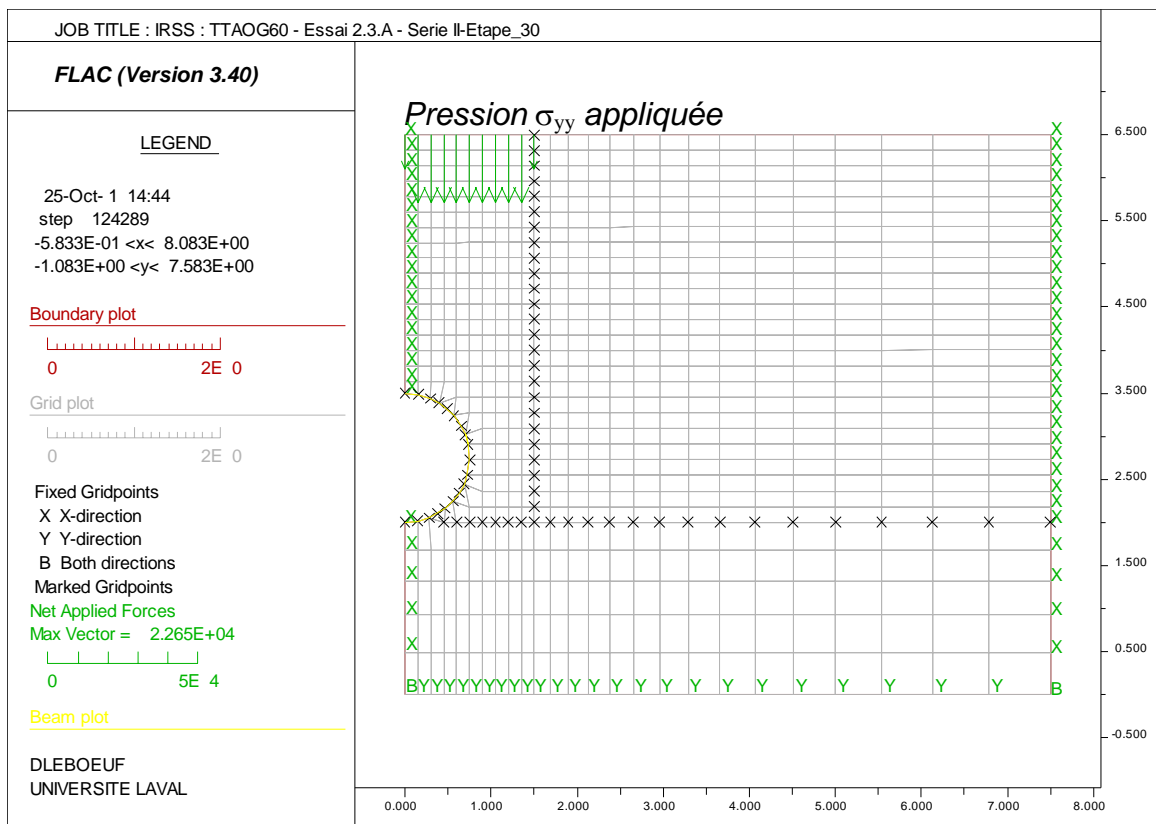


Figure 5.3 - Conditions aux frontières utilisées pour les modèles numériques :
(a) tranchée de type A; b) tranchée de type B



**Figure 5.4 - Essai 2.3.A : TTAOG-60 - Excavation de type A
 Maillage, conditions aux frontières et pression appliquée**

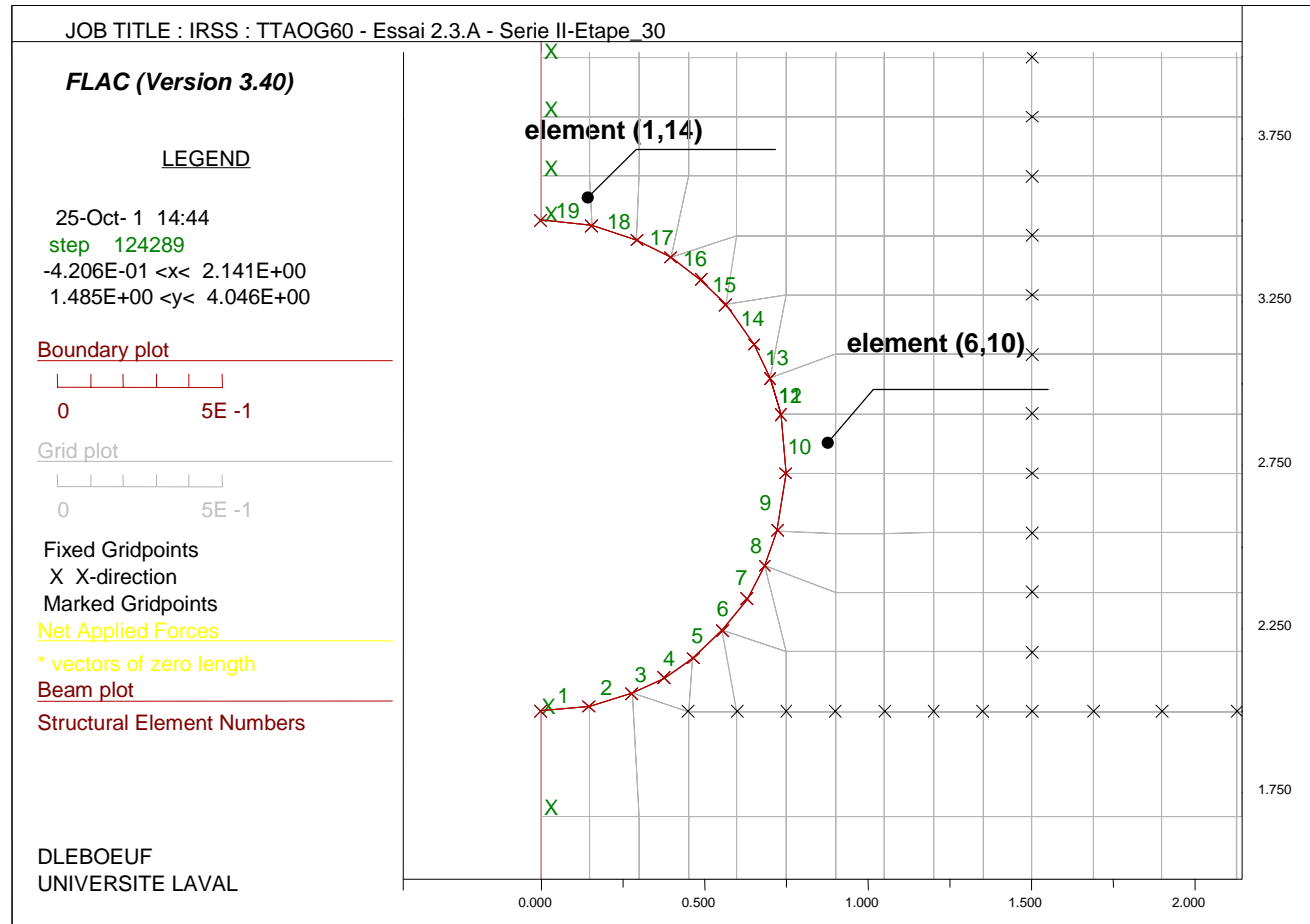


Figure 5.5 - Essai 2.3.A : TTAOG-60 - Excavation de type A
Zoom sur le maillage et les éléments structuraux (en jaune) représentant le TTAOG-60

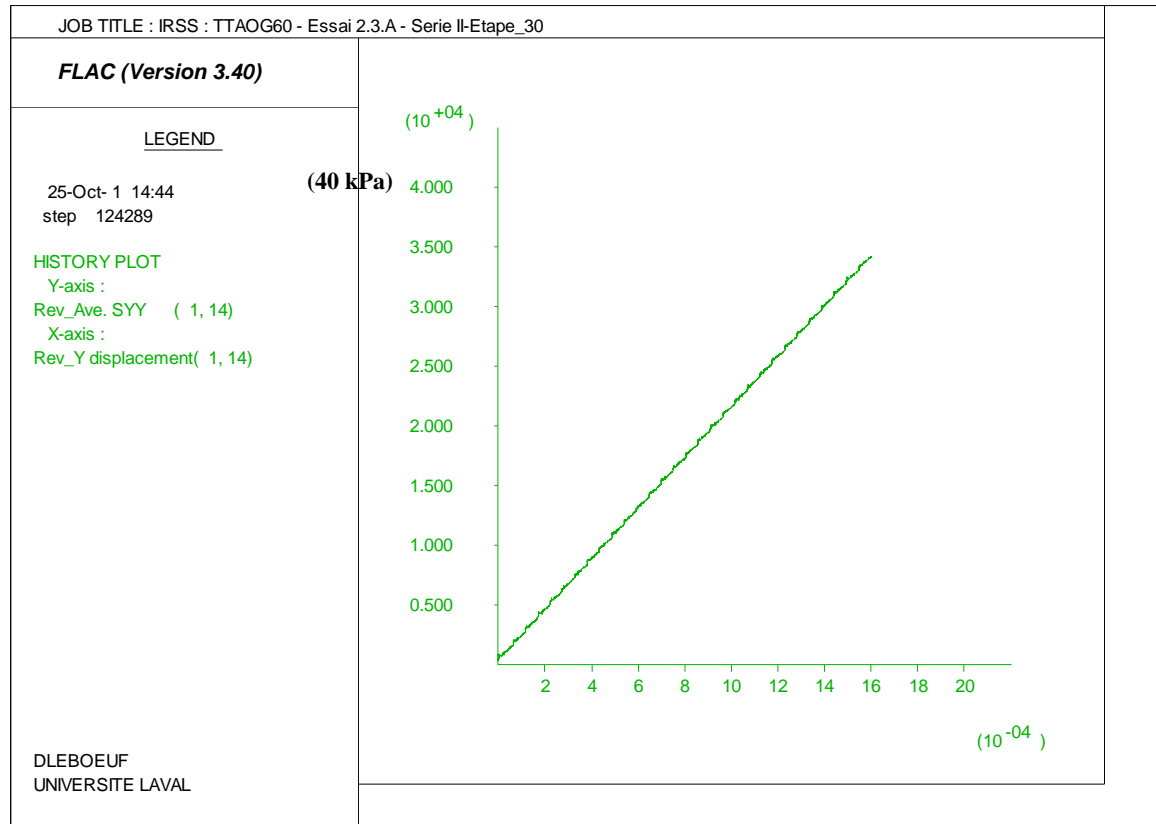


Figure 5.6 - Essai 2.3.A : TTAOG-60 - Excavation de type A
Historique de l'évolution de σ_{yy} (en Pascal) en fct du déplacement vertical (en m)
pour l'élément (1,14) durant le chargement

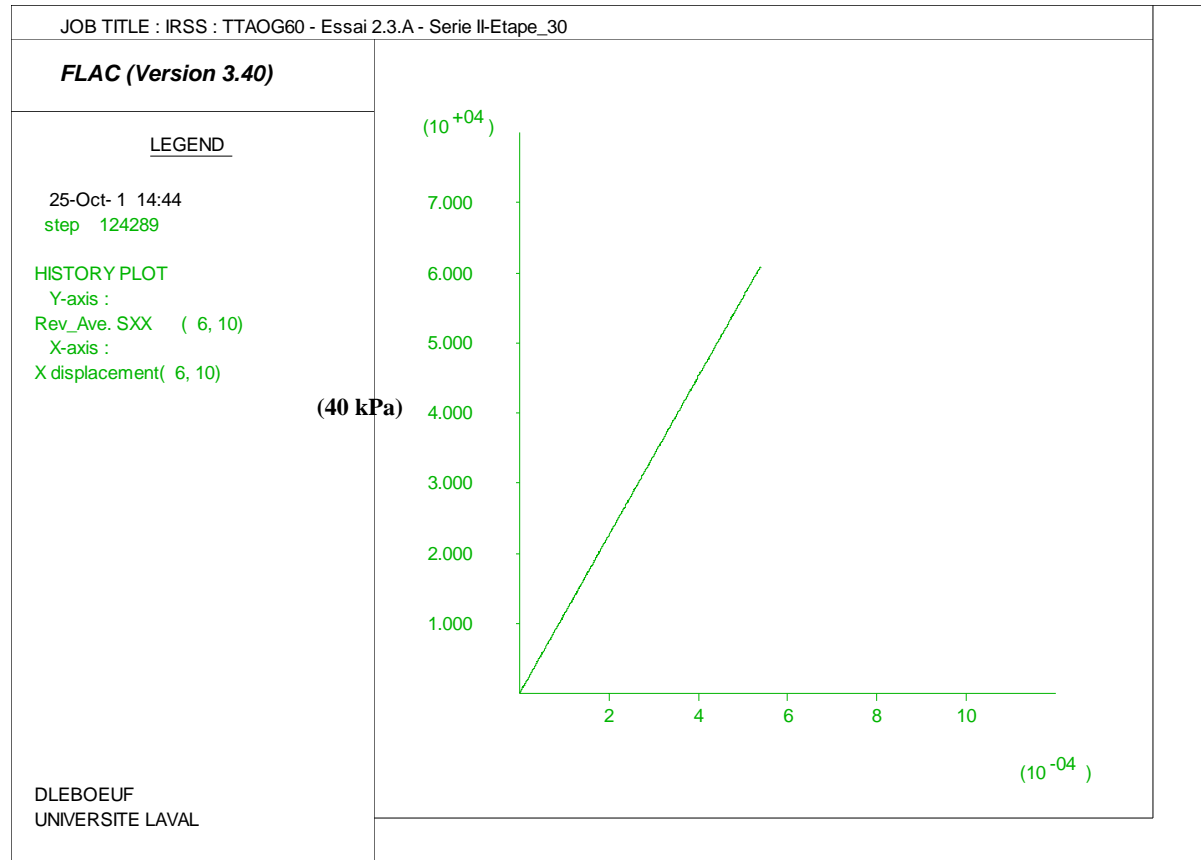
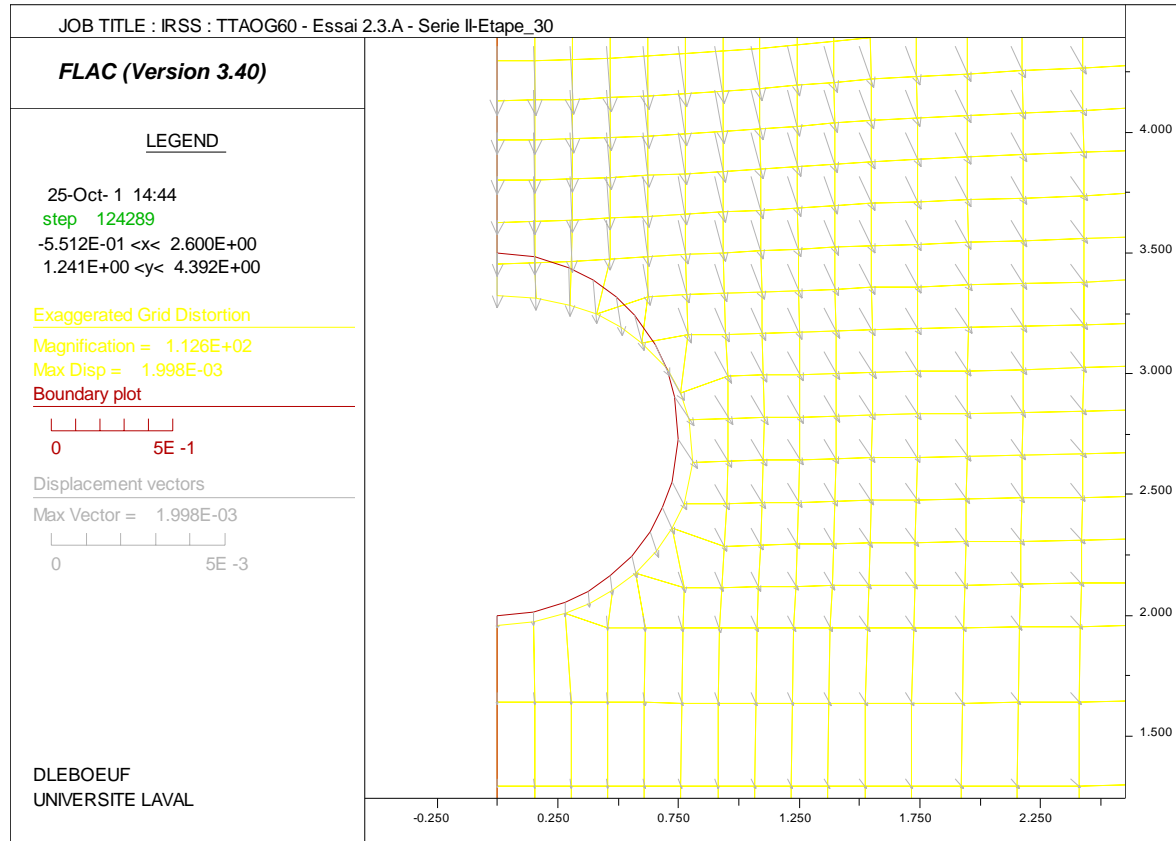


Figure 5.7 - Essai 2.3.A : TTAOG-60 - Excavation de type A
Historique de l'évolution du déplacement horizontal (en m) en fct de σ_{xx} (en Pascal)
pour l'élément (6,10) durant le chargement



**Figure 5.8 - Essai 2.3.A : TTAOG-60 - Excavation de type A
 Déformée du tuyau en fin de chargement et vecteurs de déplacement calculés par FLAC**

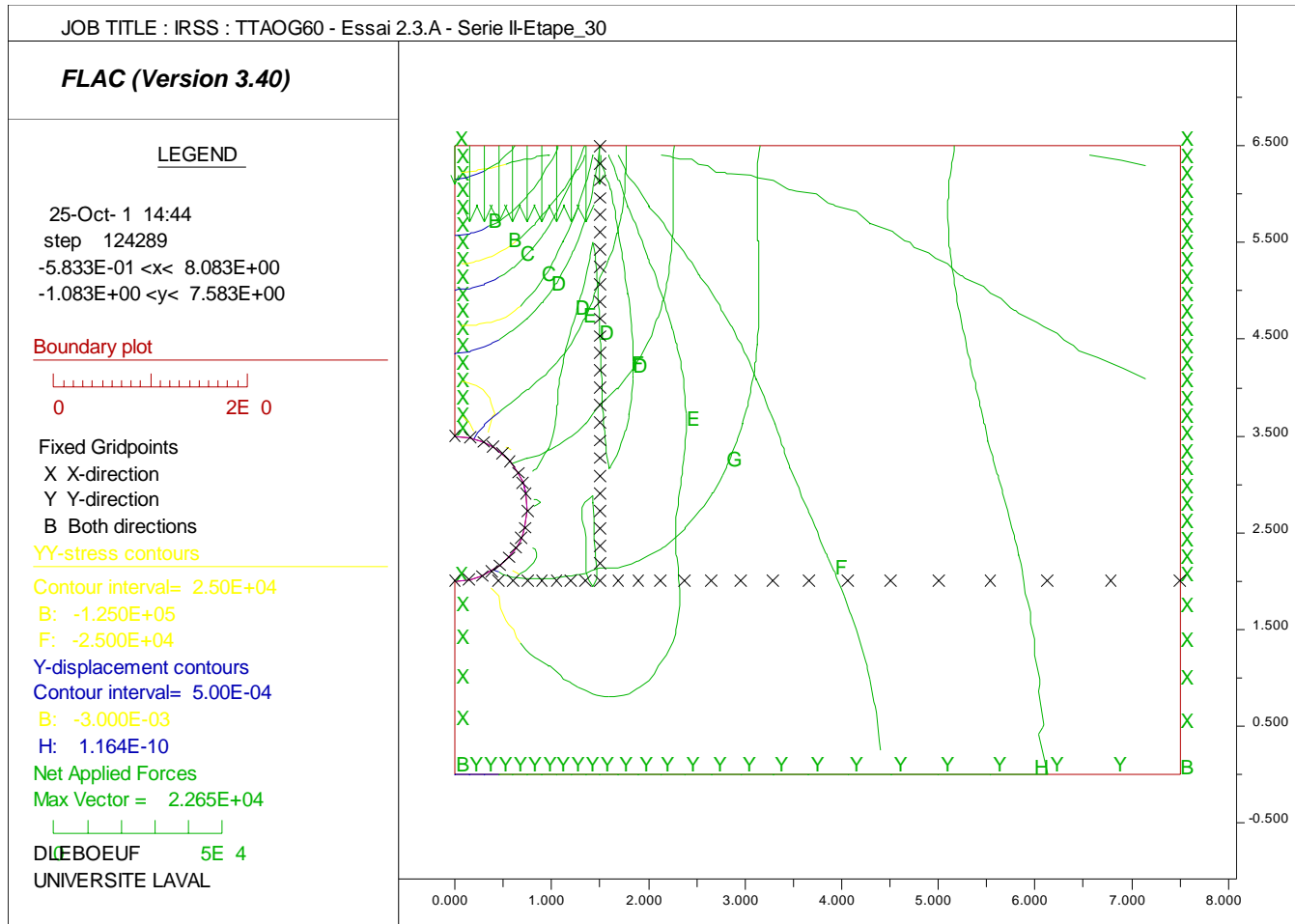
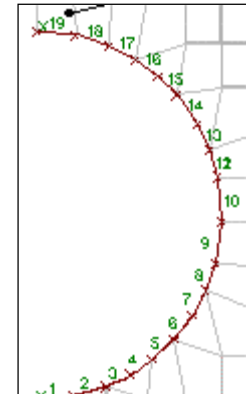


Figure 5.9 - Essai 2.3.A : TTAOG-60 - Excavation de type A
Isocontours de σ_{yy} ,du déplacement vertical (*ydisp*)

Tableau 5.4
Essai 2.3.A : TTAOG-60 - Excavation de type A
Efforts de cisaillement, axiaux et moments dans le tuyau TTAOG-60
Dernière étape de chargement (no 30: $\sigma_{yy(1,14)}=34,2$ kPa)

Elem	ID	Nod1	Nod2	Prop		F-shear (N)	F-axial (N)	Mom-1 (kN-m)	Mom-2 (N-m)
19	1	18	19	1	beam	-7.627E+01	9.794E+03	4.408E+01	-5.606E+01
18	1	17	18	1	beam	-1.666E+02	1.539E+04	2.003E+01	-4.409E+01
17	1	16	17	1	beam	-1.777E+01	2.349E+04	1.798E+01	-2.003E+01
16	1	15	16	1	beam	-2.939E+02	3.182E+04	-1.596E+01	-1.798E+01
15	1	14	15	1	beam	1.204E+02	4.020E+04	-3.025E+00	1.596E+01
14	1	13	14	1	beam	-3.244E+02	4.792E+04	-5.160E+01	3.023E+00
13	1	12	13	1	beam	2.090E+02	5.483E+04	-2.752E+01	5.160E+01
12	1	11	12	1	beam	-7.704E+01	2.843E+04	-2.264E+01	1.376E+01
11	1	11	12	1	beam	-7.704E+01	2.843E+04	-2.264E+01	1.376E+01
10	1	10	11	1	beam	6.804E+01	5.651E+04	-3.309E+01	4.527E+01
9	1	9	10	1	beam	7.019E+01	5.223E+04	-2.070E+01	3.309E+01
8	1	8	9	1	beam	2.342E+02	4.617E+04	6.135E+00	2.070E+01
7	1	7	8	1	beam	-2.945E+02	4.063E+04	-2.761E+01	-6.135E+00
6	1	6	7	1	beam	4.781E+02	3.318E+04	3.129E+01	2.760E+01
5	1	5	6	1	beam	-2.321E+02	2.608E+04	2.692E+00	-3.129E+01
4	1	4	5	1	beam	2.583E+02	2.028E+04	3.069E+01	-2.692E+00
3	1	3	4	1	beam	-1.031E+02	1.605E+04	1.951E+01	-3.069E+01
2	1	2	3	1	beam	-7.372E+01	9.247E+03	9.404E+00	-1.951E+01
1	1	1	2	1	beam	5.216E+01	5.547E+03	1.711E+01	-9.404E+00



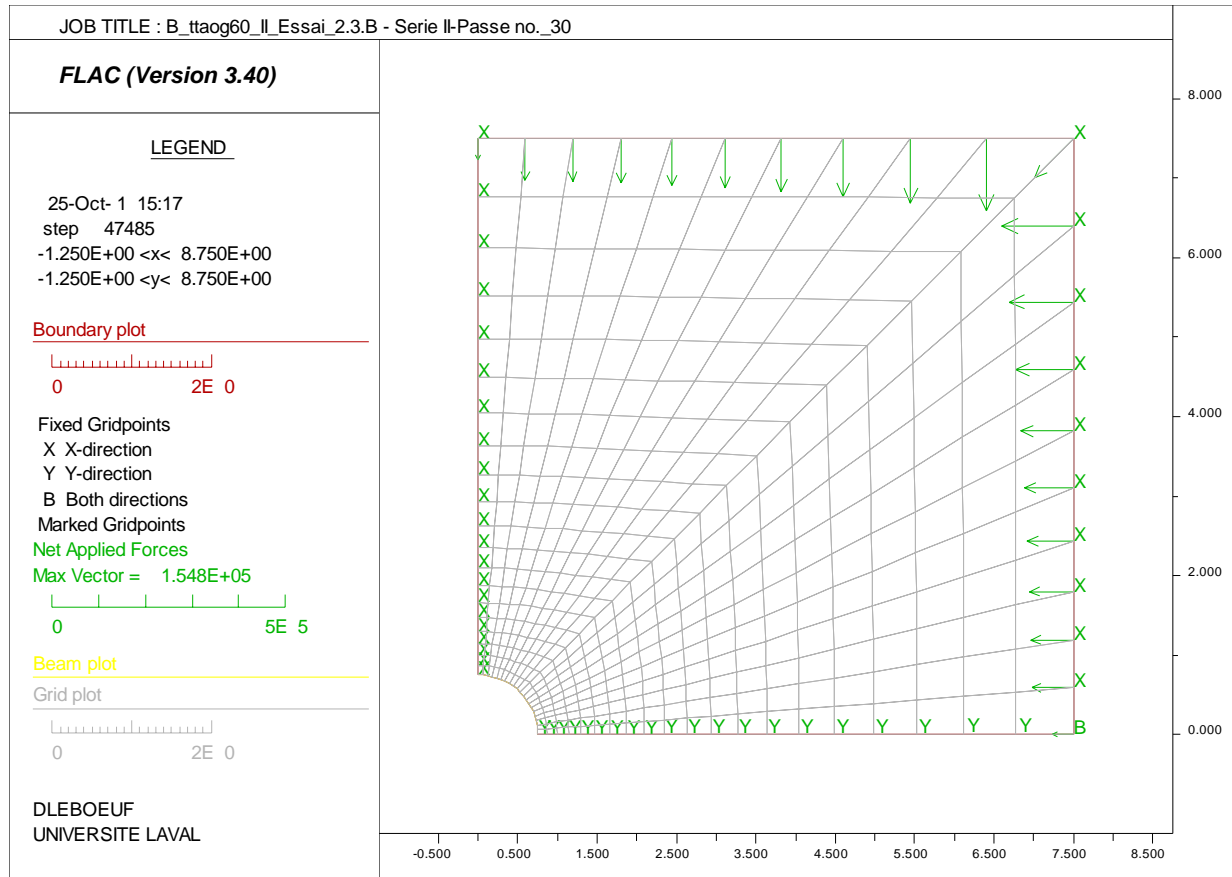
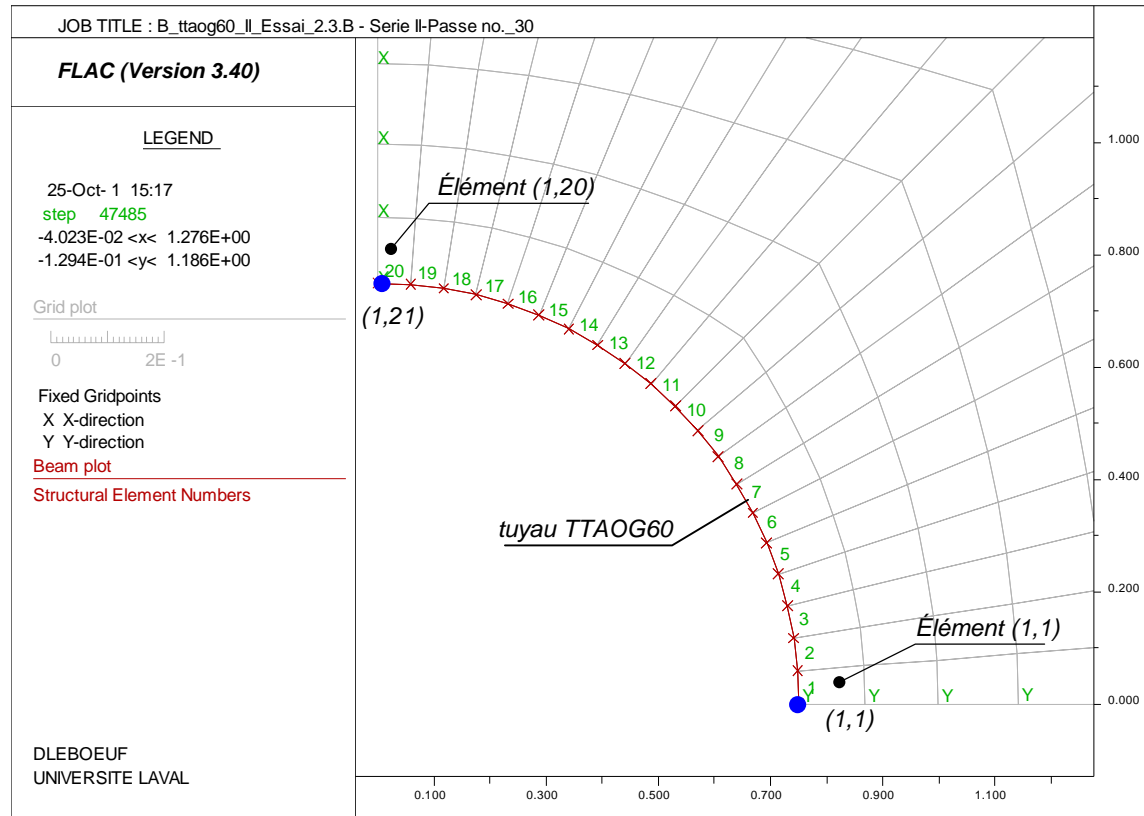


Figure 5.10 - Essai 2.3.B : TTAOG-60 - Excavation de type B
Maillage, conditions aux frontières et pression appliquée aux frontières (lors de la dernière étape de calcul)



● (1,1) et (1,21) sont les points nodaux pour lesquels le déplacement y est présenté.

Figure 5.11 - Essai 2.3.B : TTAOG-60 - Excavation de type B
Zoom sur le maillage et les éléments structuraux (en jaune) représentant le TTAOG-60
(en raison de la symétrie, seulement 1/4 du tuyau nécessite d'être modélisé)

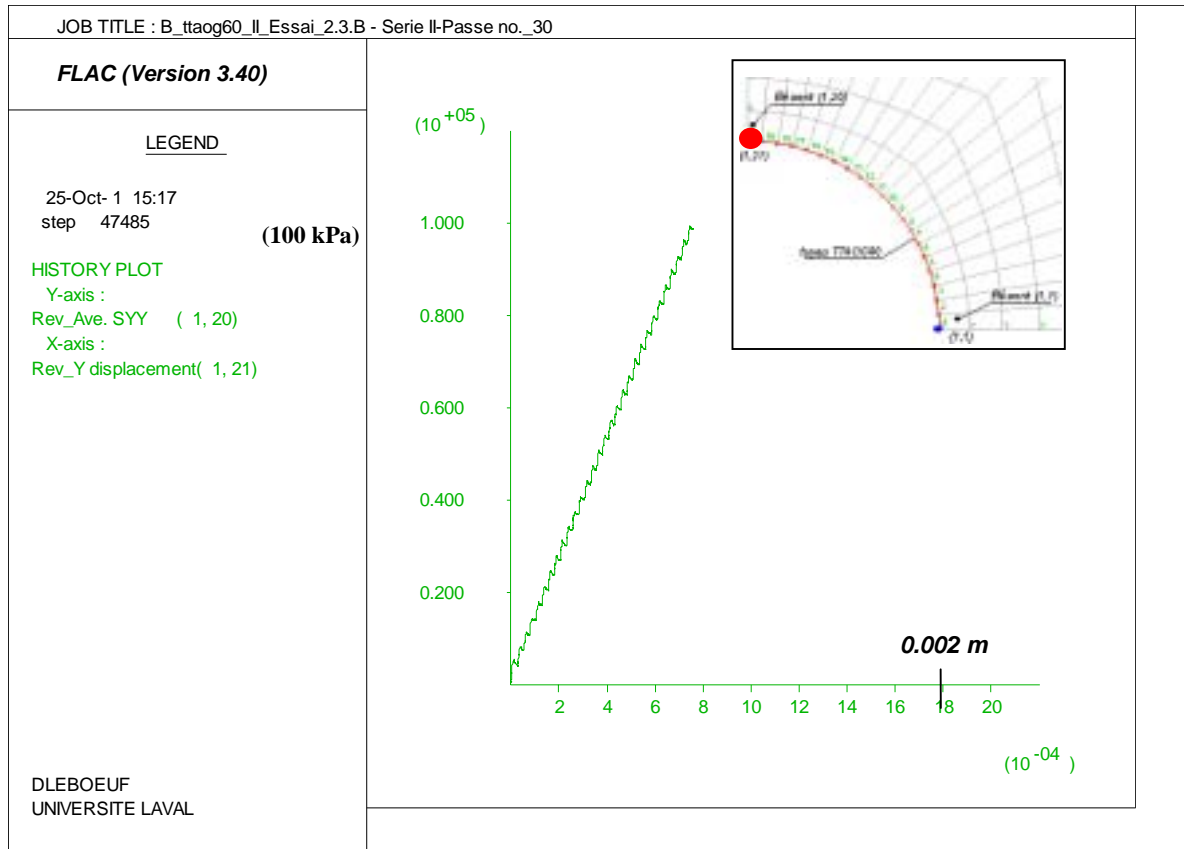


Figure 5.12 - Essai 2.3.B : TTAOG-60 - Excavation de type B
Historique de l'évolution du déplacement vertical (en m) en fct de σ_{yy} (en Pascal)
pour le nœud (1,21) durant le chargement

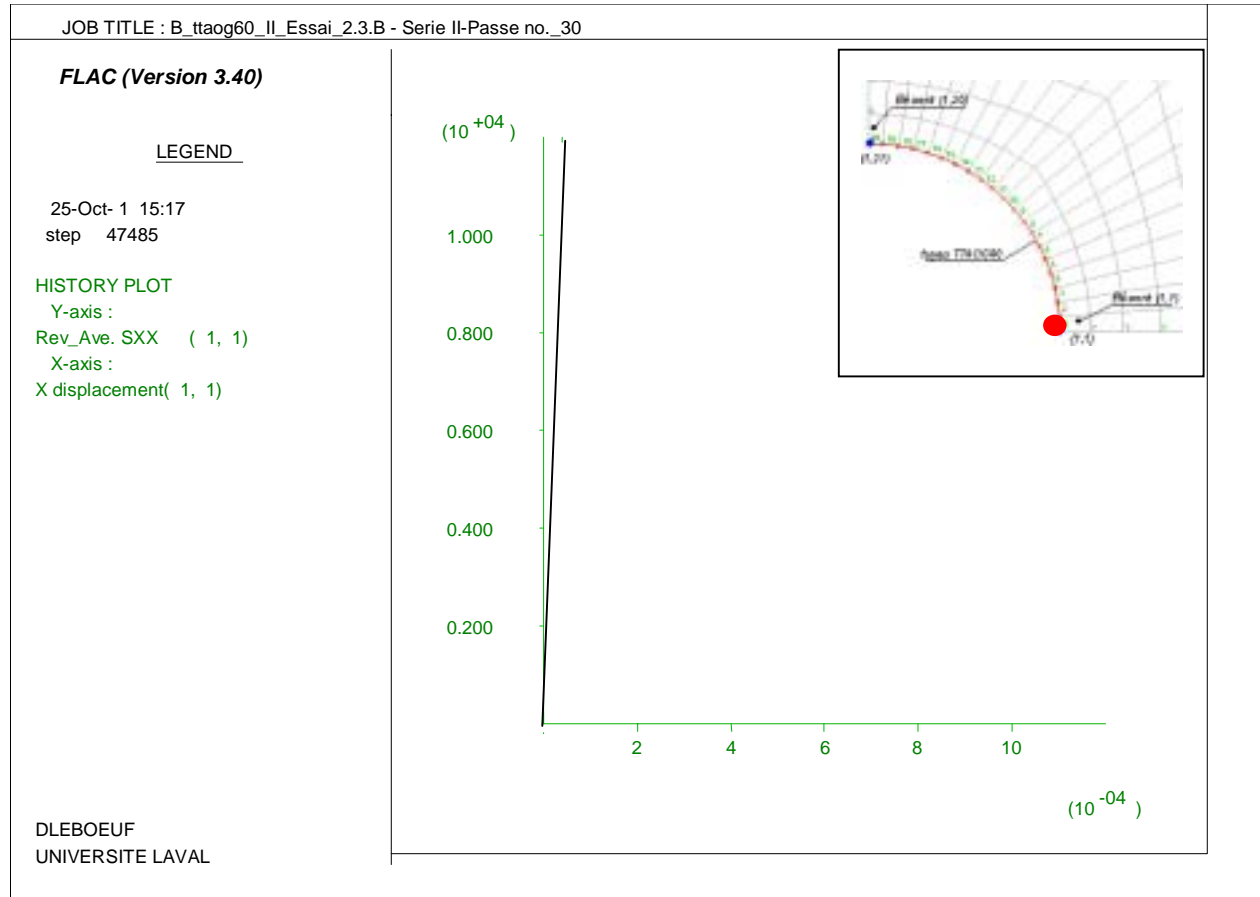


Figure 5.13 - Essai 2.3.B : TTAOG-60 - Excavation de type B
Historique de l'évolution du déplacement horizontal ($xdisp$) en fct de σ_{xx} pour le nœud (1,1) durant le chargement
(note : les déplacements sont très faibles)

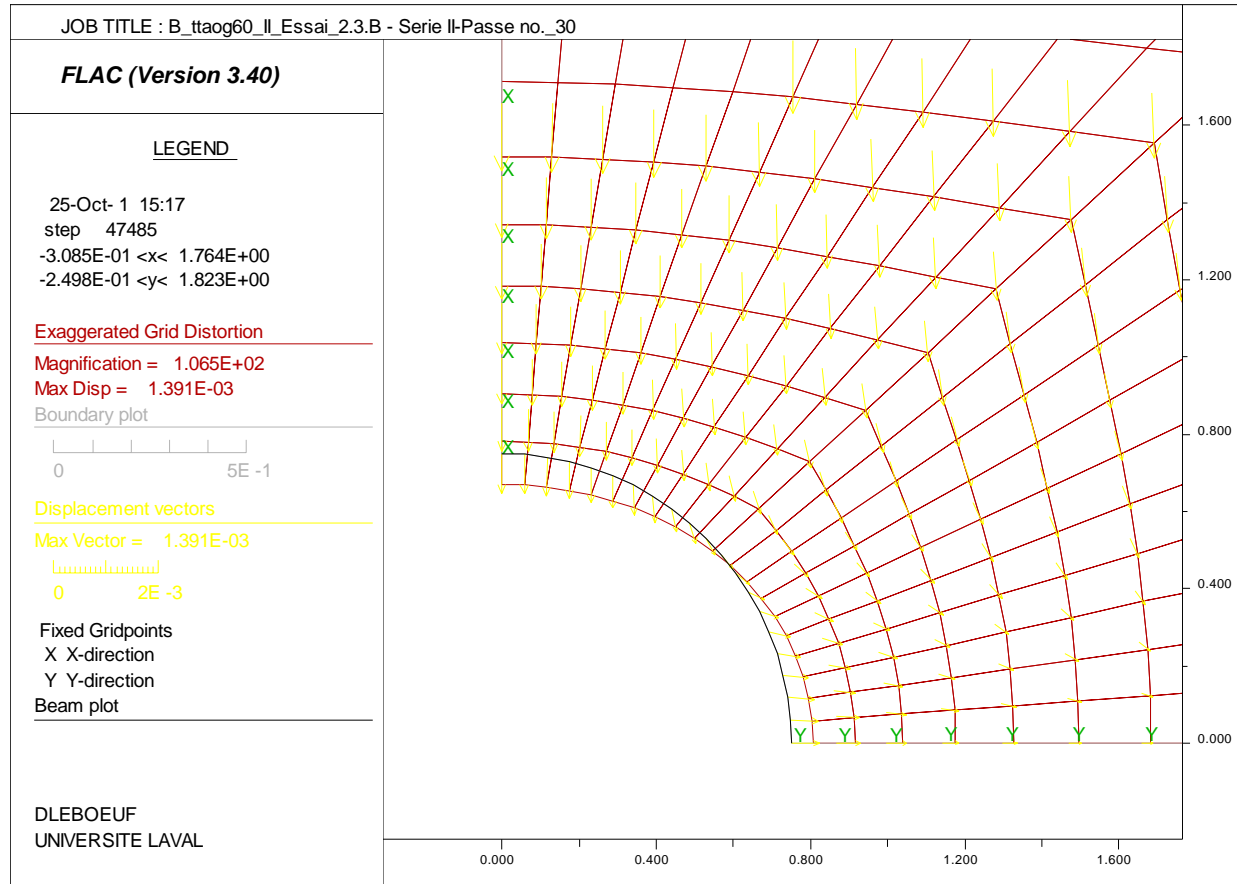


Figure 5.14 - Essai 2.3.B : TTAOG-60 - Excavation de type B
Déformée du tuyau en fin de chargement et vecteurs de déplacement calculés par FLAC

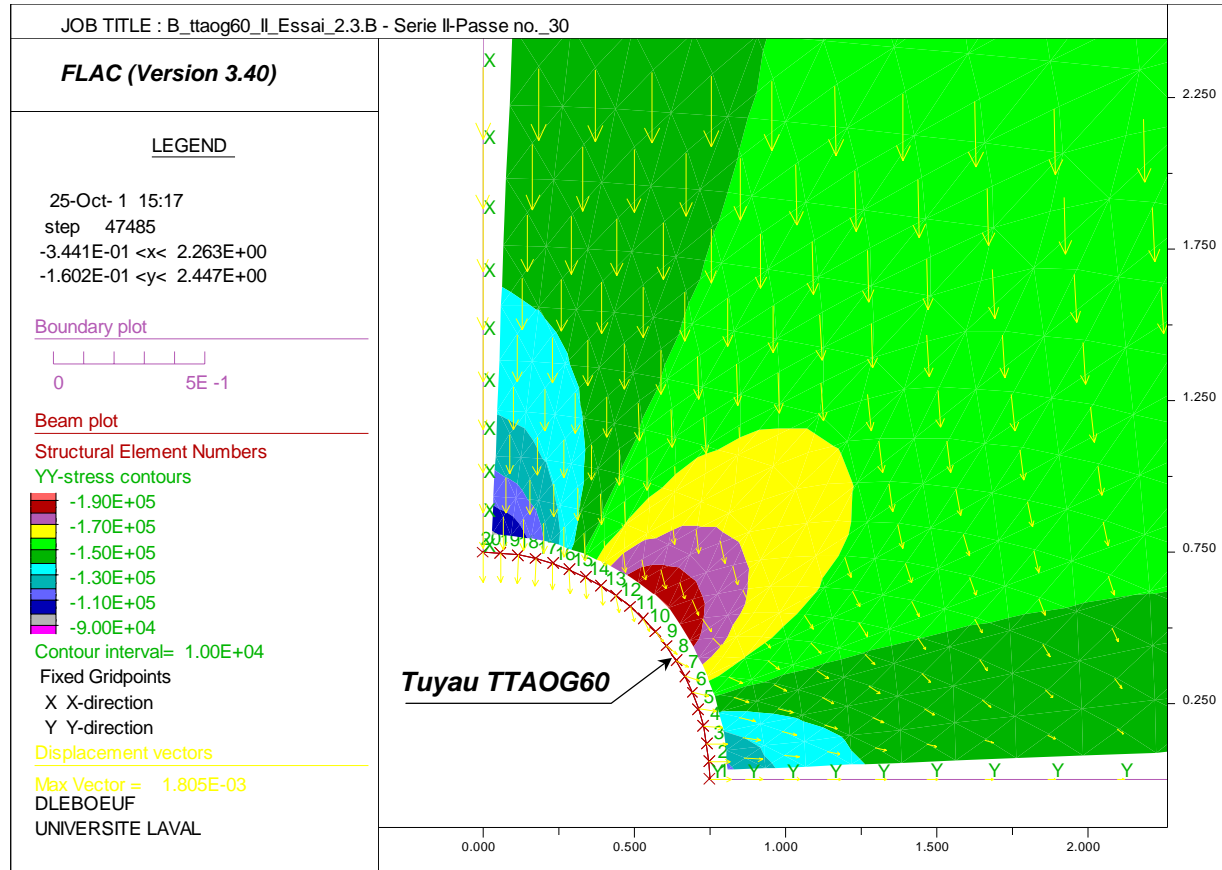
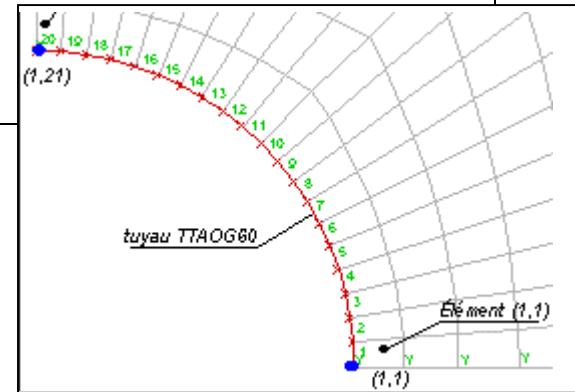
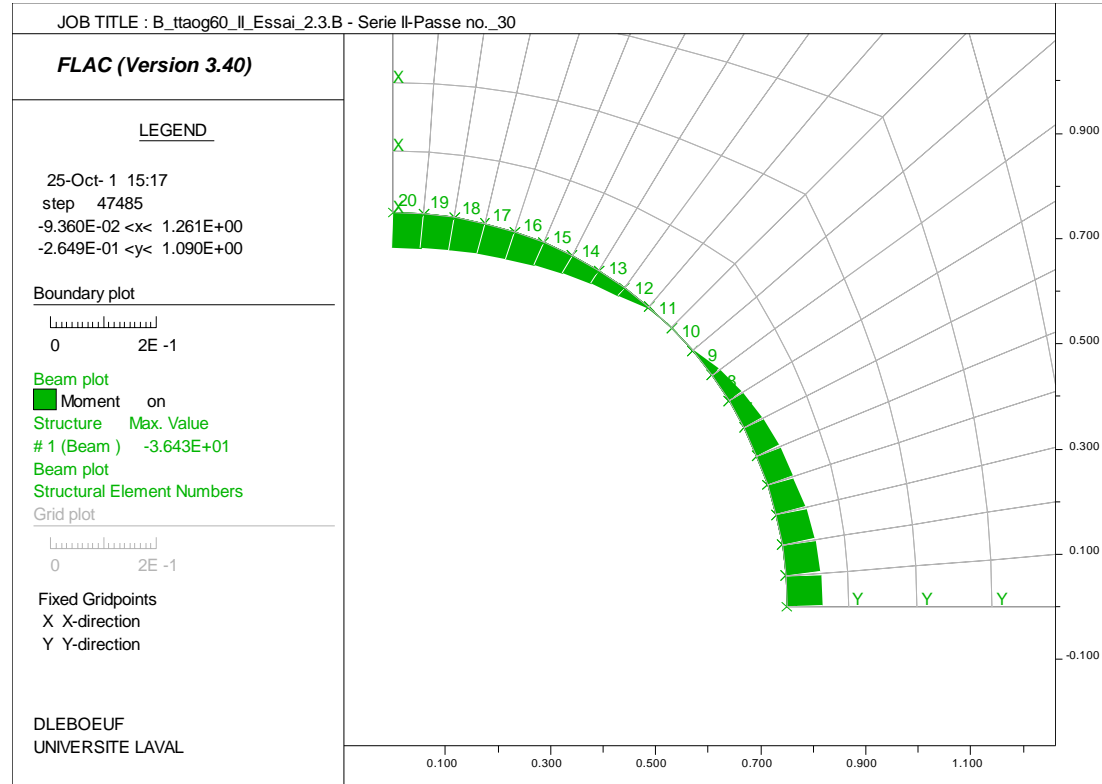


Figure 5.15 - Essai 2.3.B : TTAOG-60 - Excavation de type B
Isocontours de la contrainte σ_{yy} et vecteurs-déplacements calculés par FLAC

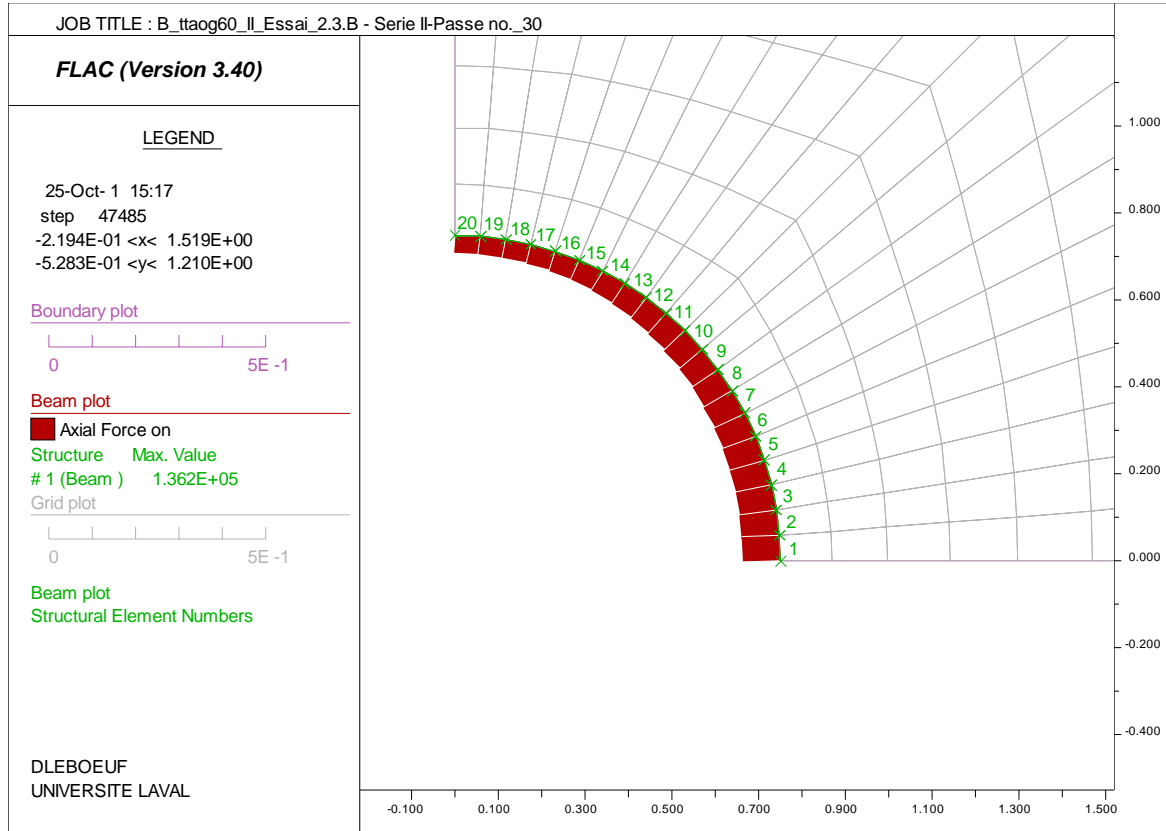
Tableau 5.5
Essai 2.3.B : TTAOG-60 - Excavation de type B
Efforts de cisaillement, axiaux et moments dans le tuyau TTAOG-60
Dernière étape de chargement (n° 30 : $\sigma_{yy(1,14)}=34,2 \text{ kPa}$)

Elem	ID	Nod1	Nod2	Prop		F-shear (N)	F-axial (N)	Mom-1 (N-m)	Mom-2 (N-m)
20	1	20	21	1	beam	-1.082E+01	6.495E+04	3.546E+01	-3.610E+01
19	1	19	20	1	beam	-2.795E+01	6.582E+04	3.382E+01	-3.546E+01
18	1	18	19	1	beam	-3.311E+01	6.755E+04	3.188E+01	-3.383E+01
17	1	17	18	1	beam	-4.434E+01	7.008E+04	2.928E+01	-3.189E+01
16	1	16	17	1	beam	-7.164E+01	7.337E+04	2.508E+01	-2.930E+01
15	1	15	16	1	beam	-7.877E+01	7.732E+04	2.044E+01	-2.508E+01
14	1	14	15	1	beam	-7.562E+01	8.185E+04	1.599E+01	-2.044E+01
13	1	13	14	1	beam	-8.644E+01	8.685E+04	1.090E+01	-1.599E+01
12	1	12	13	1	beam	-1.488E+02	9.220E+04	2.137E+00	-1.090E+01
11	1	11	12	1	beam	-5.132E+01	9.778E+04	-8.889E-01	-2.131E+00
10	1	10	11	1	beam	-5.674E+00	1.035E+05	-1.221E+00	8.880E-01
9	1	9	10	1	beam	-1.449E+02	1.090E+05	-9.756E+00	1.224E+00
8	1	8	9	1	beam	-1.140E+02	1.143E+05	-1.646E+01	9.750E+00
7	1	7	8	1	beam	-8.933E+01	1.193E+05	-2.172E+01	1.646E+01
6	1	6	7	1	beam	-6.536E+01	1.238E+05	-2.557E+01	2.172E+01
5	1	5	6	1	beam	-2.999E+01	1.278E+05	-2.733E+01	2.557E+01
4	1	4	5	1	beam	-7.395E+01	1.310E+05	-3.169E+01	2.733E+01
3	1	3	4	1	beam	-4.256E+01	1.336E+05	-3.418E+01	3.168E+01
2	1	2	3	1	beam	-3.086E+01	1.353E+05	-3.600E+01	3.418E+01
1	1	1	2	1	beam	-7.407E+00	1.362E+05	-3.643E+01	3.600E+01





**Figure 5.16 - Essai 2.3.B : TTAOG-60 - Excavation de type B
 Distribution des moments de flexion le long du TTAOG-60**



**Figure 5.17 - Essai 2.3.B : TTAOG-60 - Excavation de type B
 Distribution des efforts axiaux (N) le long du TTAOG-60**

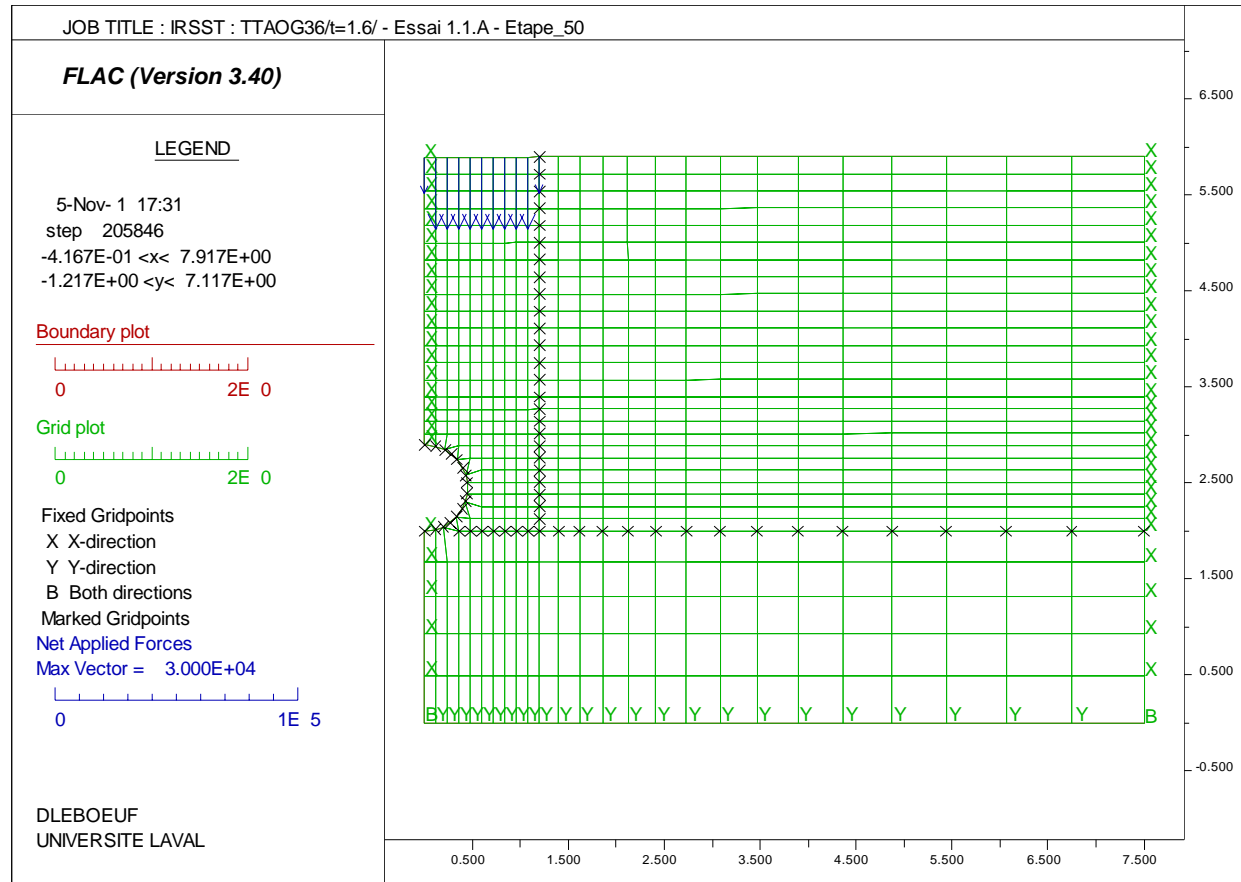


Figure 5.18 - Essai 1.1.A : TTAOG-36 - Excavation de type A
Maillage, conditions aux frontières, localisation du tuyau et pression $\Delta\sigma_{yy}$ appliquée au remblai

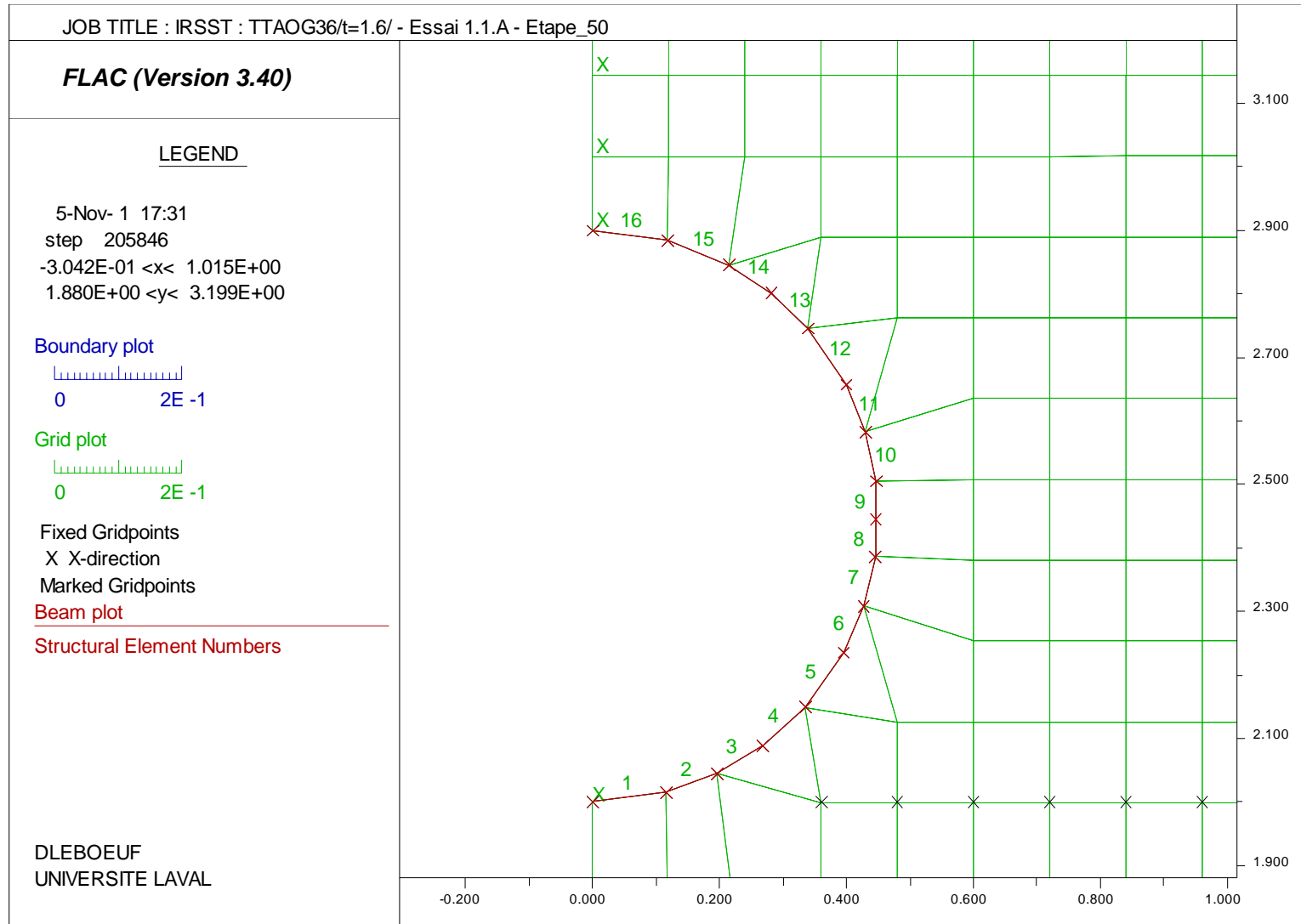


Figure 5.19 - Essai 1.1.A : TTAOG-36 - Excavation de type A
Zoom sur le maillage et les éléments structuraux représentant le TTAOG-60

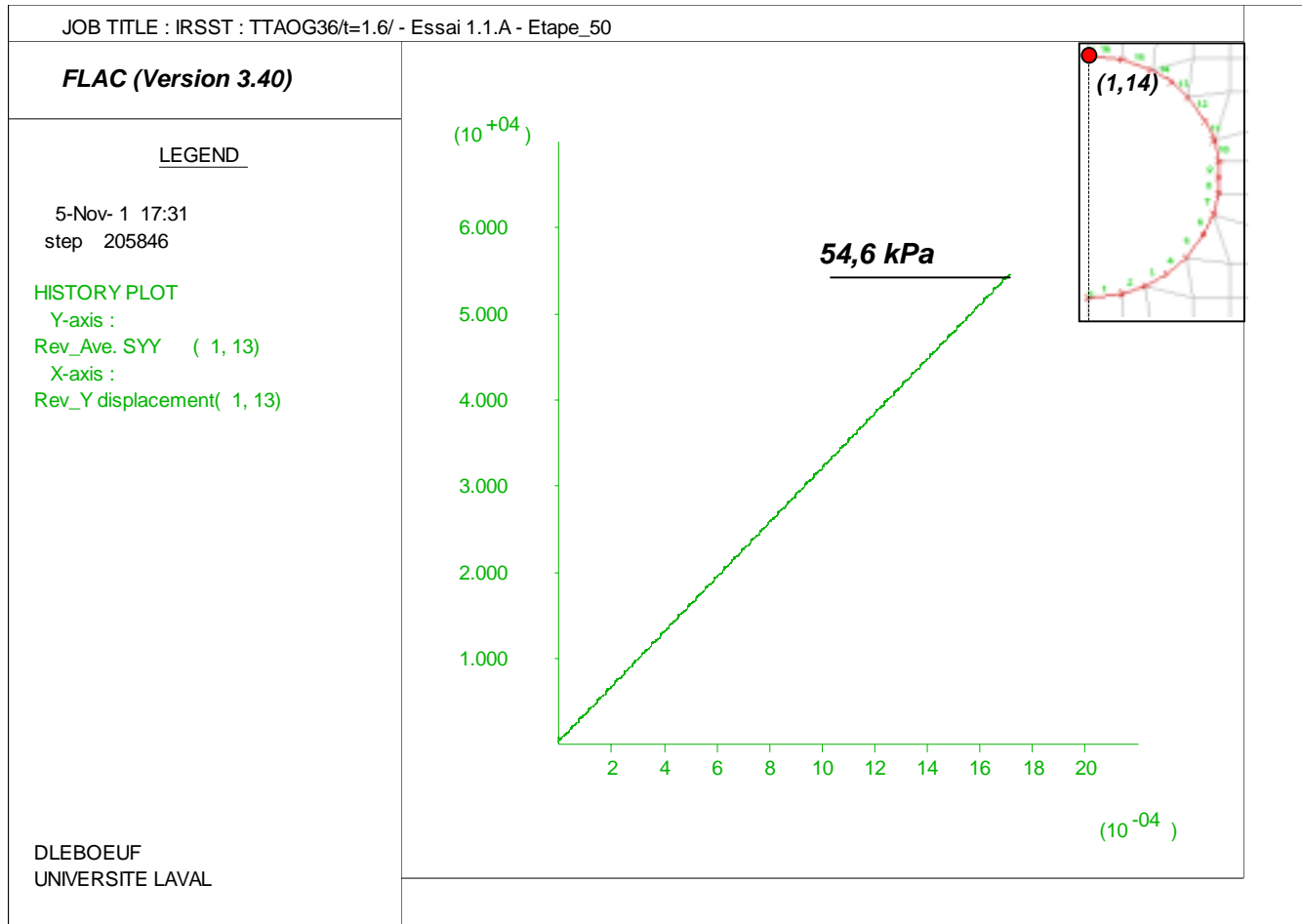


Figure 5.20 - Essai 1.1.A : TTAOG-36 - Excavation de type A
Historique de l'évolution du déplacement vertical (en m) en fct de σ_{yy} (en Pascal)
pour le nœud (1,14) durant le chargement

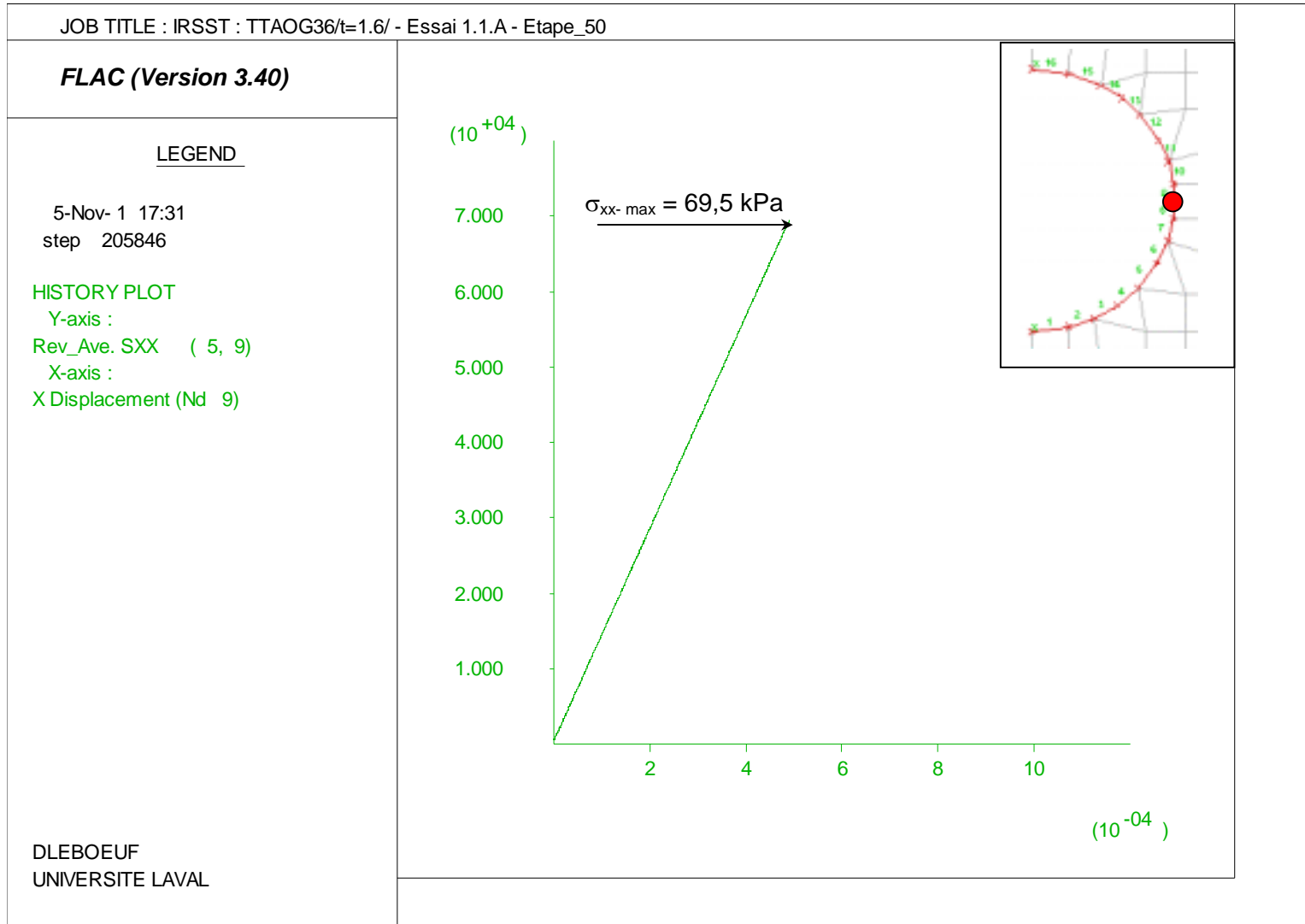


Figure 5.21 - Essai 1.1.A : TTAOG-36 - Excavation de type A
Historique de l'évolution du déplacement horizontal (en m) en fct de σ_{xx} (en Pascal)
pour le nœud (5,9) durant le chargement

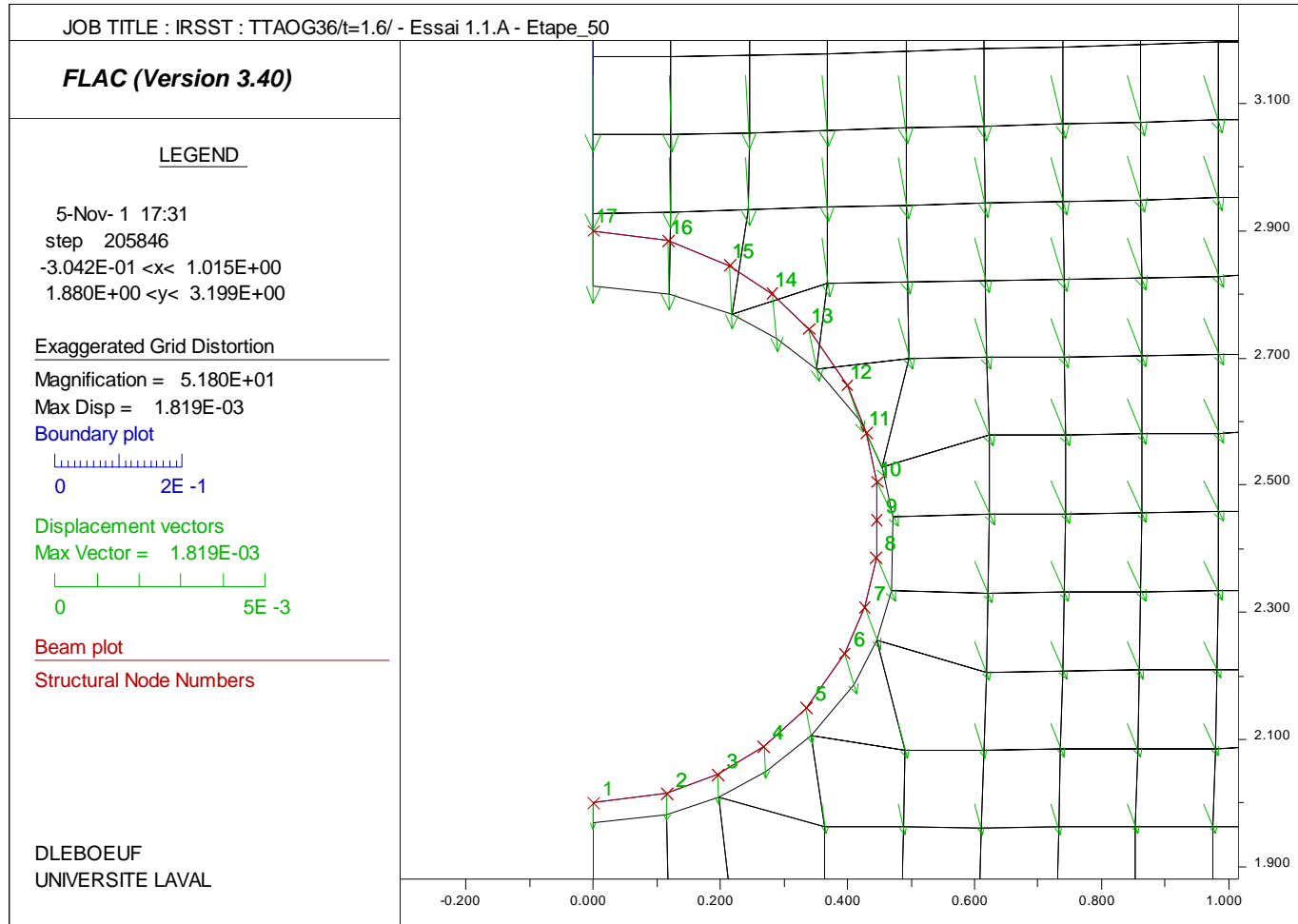


Figure 5.22 - Essai 1.1.A : TTAOG-36 - Excavation de type A
Déformée du tuyau en fin de chargement et vecteurs de déplacement calculés par FLAC

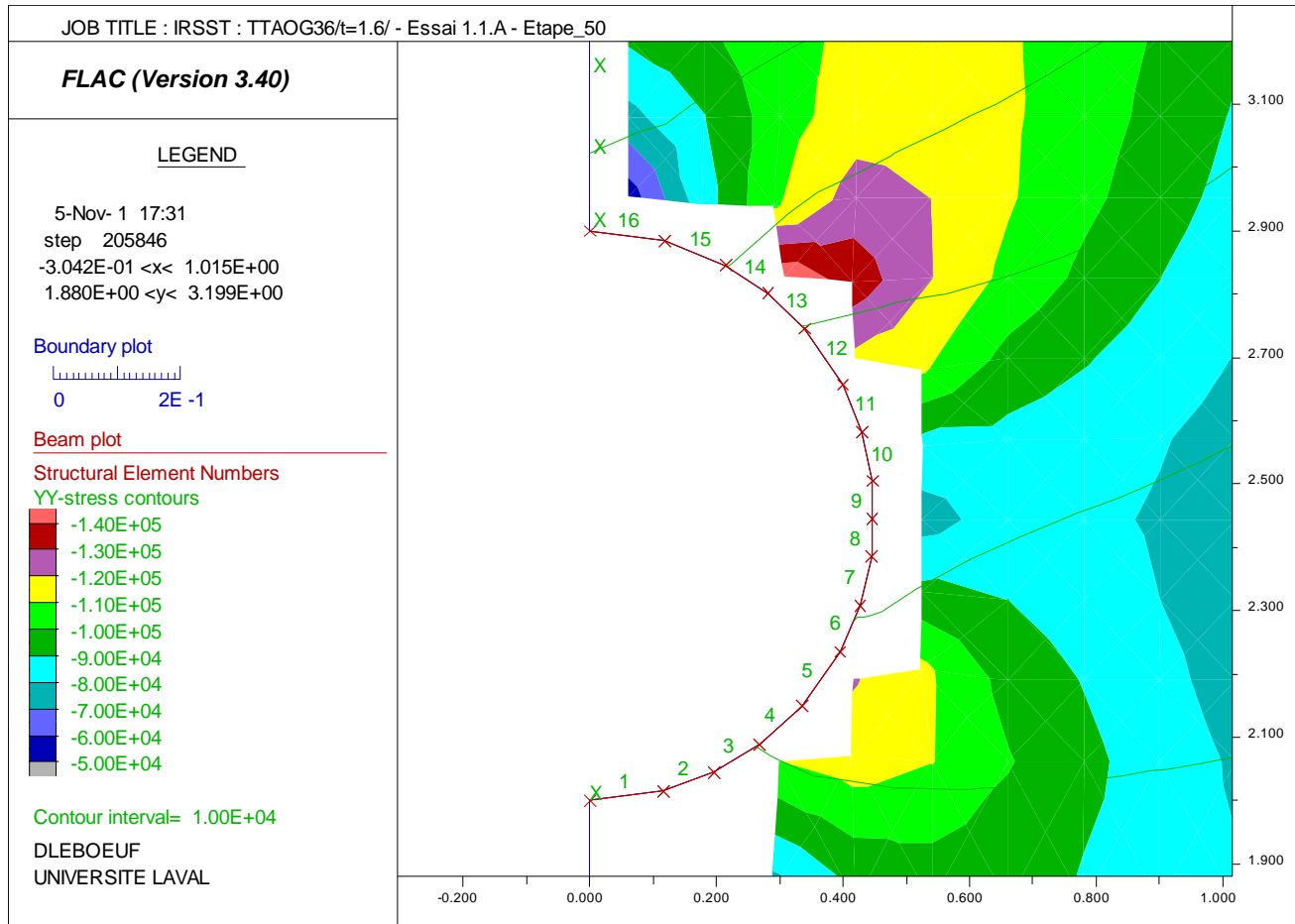
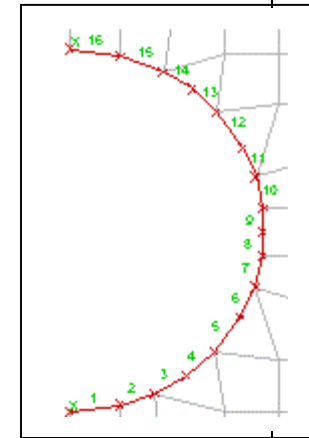


Figure 5.23 - Essai 1.1.A : TTAOG-36 - Excavation de type A
Isocontours de la contrainte σ_{yy} et du déplacement horizontal

Tableau 5.6
Essai 1.1.A : TTAOG-36 - Excavation de type A
Efforts de cisaillement, axiaux et moments dans le tuyau TTAOG-36

Dernière étape de chargement n° 50: $\sigma_{yy(1,14)} = 54,6 \text{ kPa}$ et $\sigma_{xx(5,9)} = 69,5 \text{ kPa}$

Elem	ID	Nod1	Nod2	Prop	F-shear (N)	F-axial (N)	Mom-1 (N-m)	Mom-2 (N-m)
16	1	16	17	1 beam	-3.644E+02	5.250E+03	-4.344E+01	-2.598E-03
15	1	15	16	1 beam	-1.080E+03	1.216E+04	-2.024E+00	-1.109E+02
14	1	14	15	1 beam	1.970E+01	2.090E+04	-4.467E-01	2.021E+00
13	1	13	14	1 beam	-1.877E+01	2.997E+04	-1.944E+00	4.438E-01
12	1	12	13	1 beam	-2.838E+02	3.913E+04	-3.239E+01	1.942E+00
11	1	11	12	1 beam	2.561E+02	4.692E+04	-1.195E+01	3.239E+01
10	1	10	11	1 beam	-1.738E+02	4.889E+04	-2.583E+01	1.195E+01
9	1	9	10	1 beam	2.997E+01	4.855E+04	-2.405E+01	2.583E+01
8	1	8	9	1 beam	4.982E+01	4.855E+04	-2.111E+01	2.405E+01
7	1	7	8	1 beam	2.363E+02	4.418E+04	-2.190E+00	2.111E+01
6	1	6	7	1 beam	-2.017E+02	3.892E+04	-1.834E+01	2.190E+00
5	1	5	6	1 beam	2.875E+02	3.013E+04	1.179E+01	1.834E+01
4	1	4	5	1 beam	5.745E+01	2.152E+04	1.697E+01	-1.179E+01
3	1	3	4	1 beam	-2.351E+01	1.511E+04	1.497E+01	-1.697E+01
2	1	2	3	1 beam	-1.200E+02	5.911E+03	4.754E+00	-1.497E+01
1	1	1	2	1 beam	7.081E+01	1.632E+02	1.303E+01	-4.754E+00



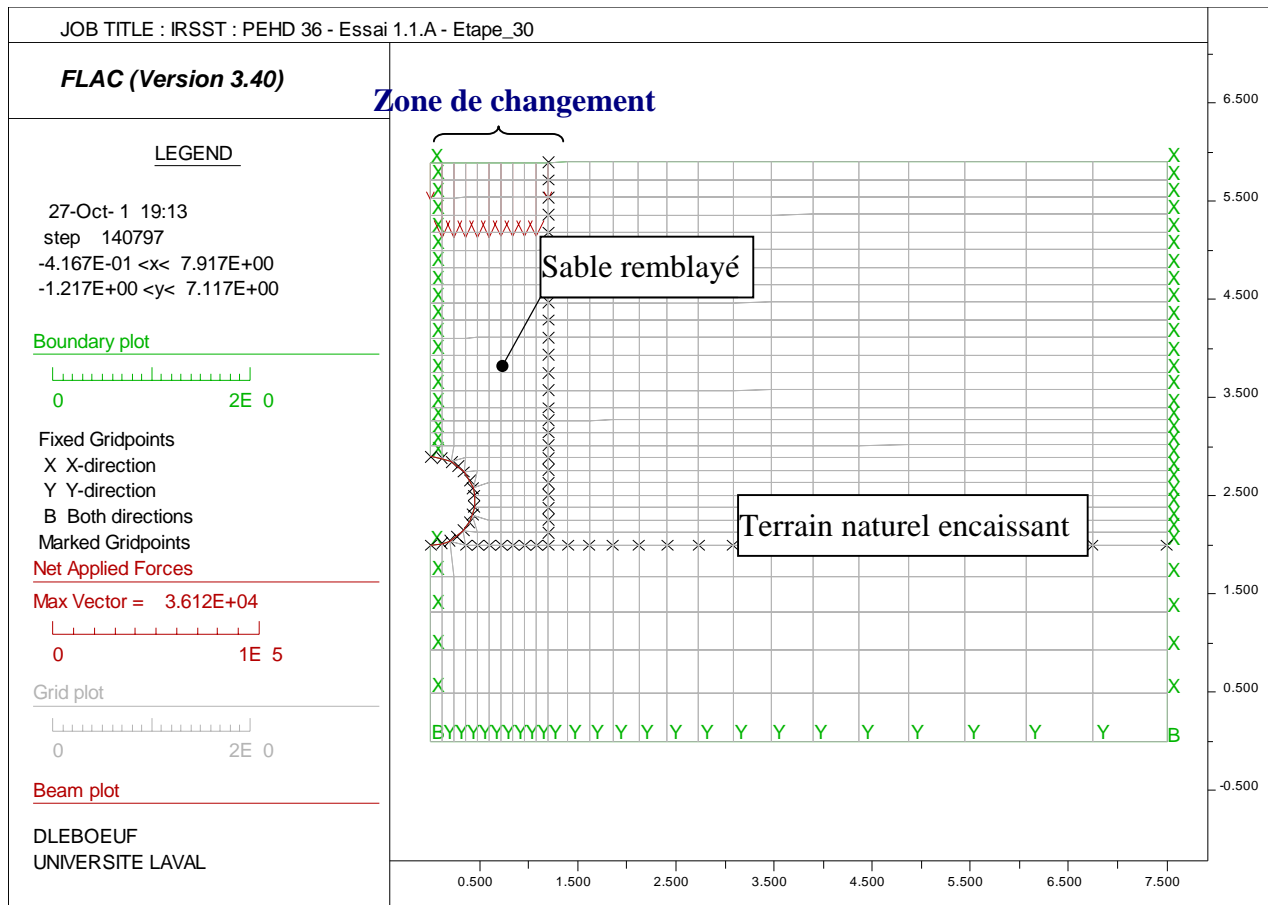


Figure 5.24 - Essai 1.1.A : PEHD-36 - Excavation de type A
Maillage, conditions aux frontières, localisation du tuyau et pression $\Delta\sigma_{yy}$ appliquée au remblai
(NOTE : cet essai n'a pas été réalisé sur le terrain)

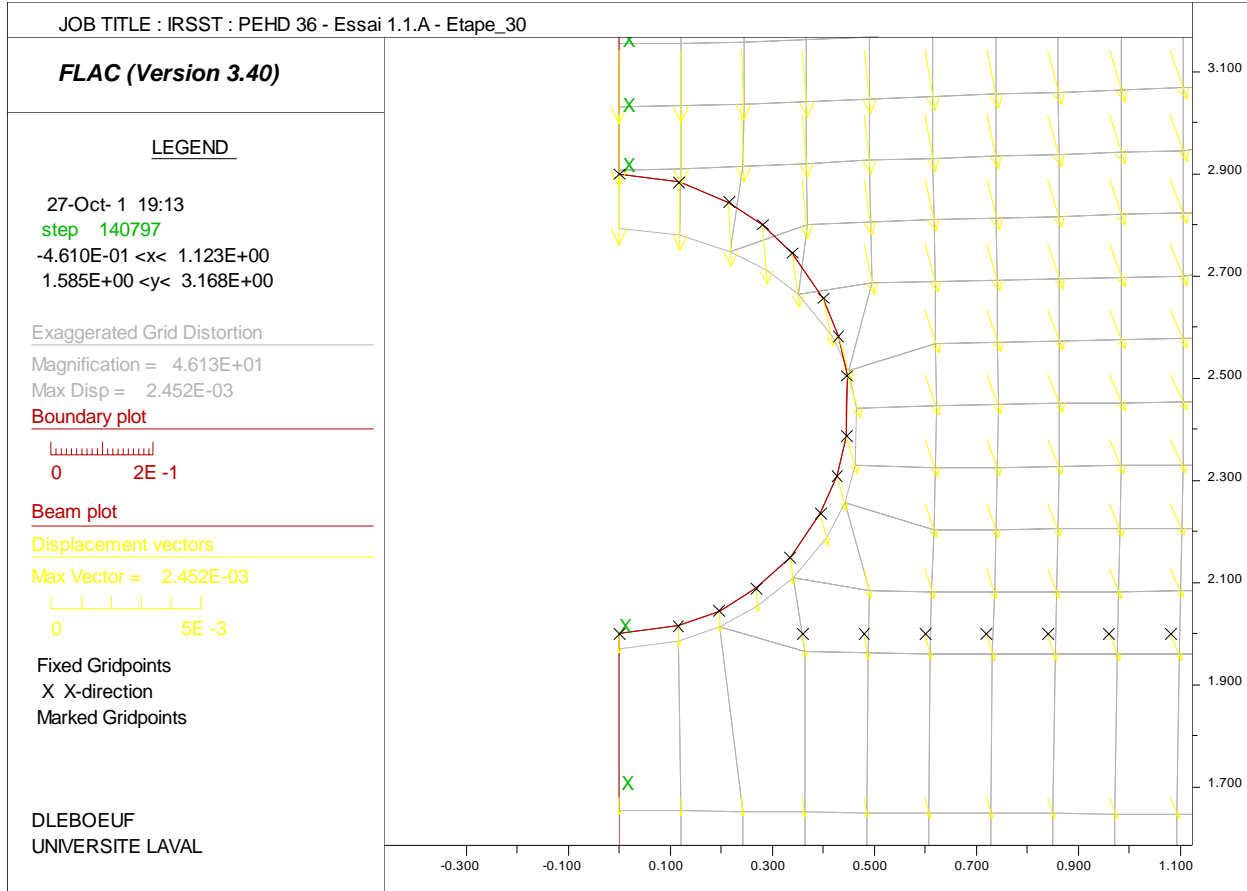


Figure 5.25 - Essai 1.1.A : PEHD-36 - Excavation de type A
Déformée du tuyau en fin de chargement et vecteurs de déplacement calculés par FLAC

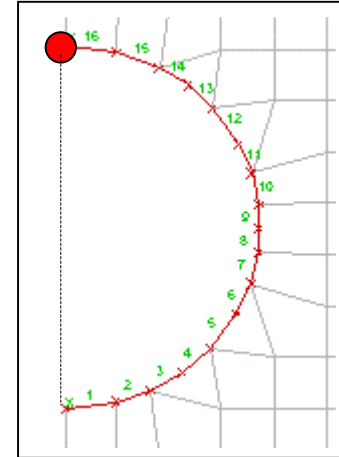
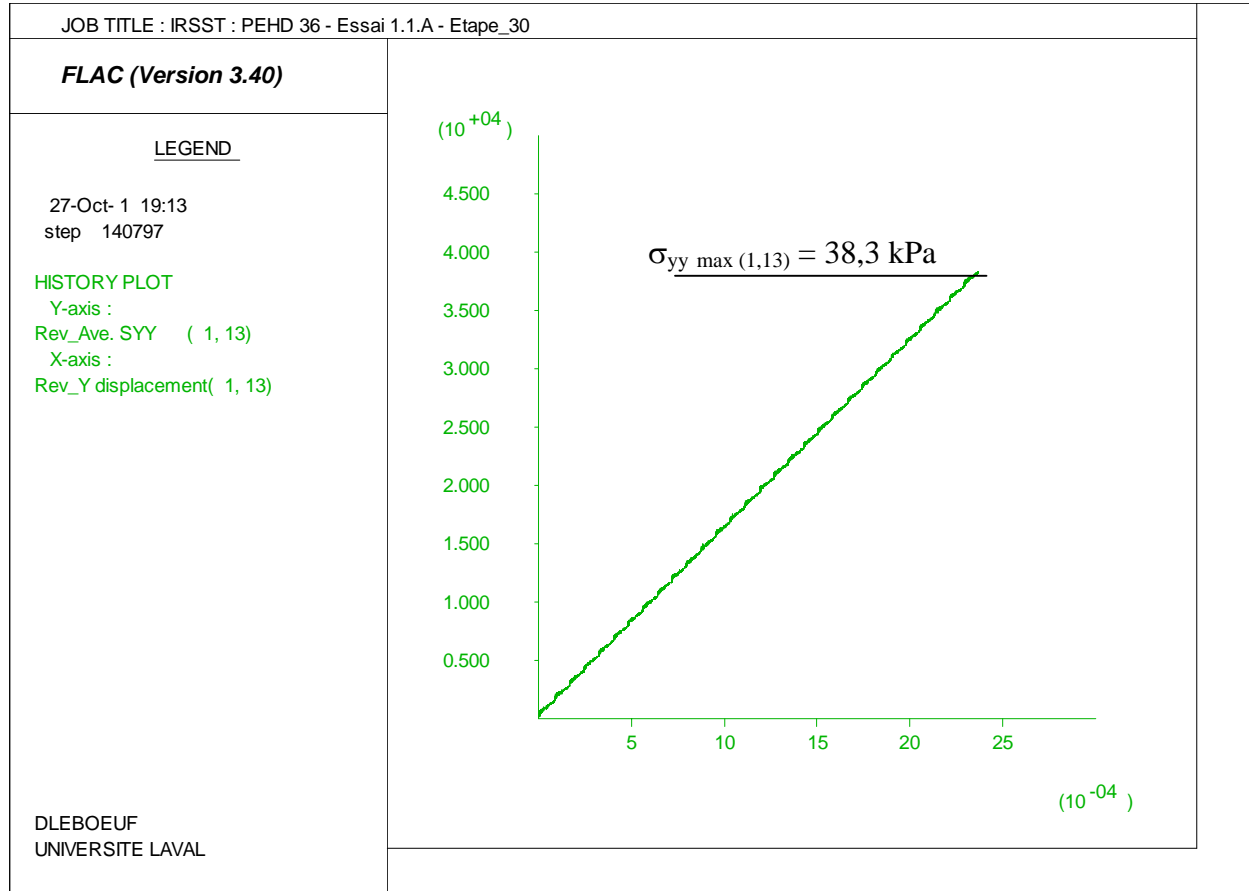


Figure 5.26 - Essai 1.1.A : PEHD-36 - Excavation de type A
Historique de l'évolution du déplacement vertical (en m) en fct de σ_{yy} (en Pascal)
pour le nœud (1,14) durant le chargement

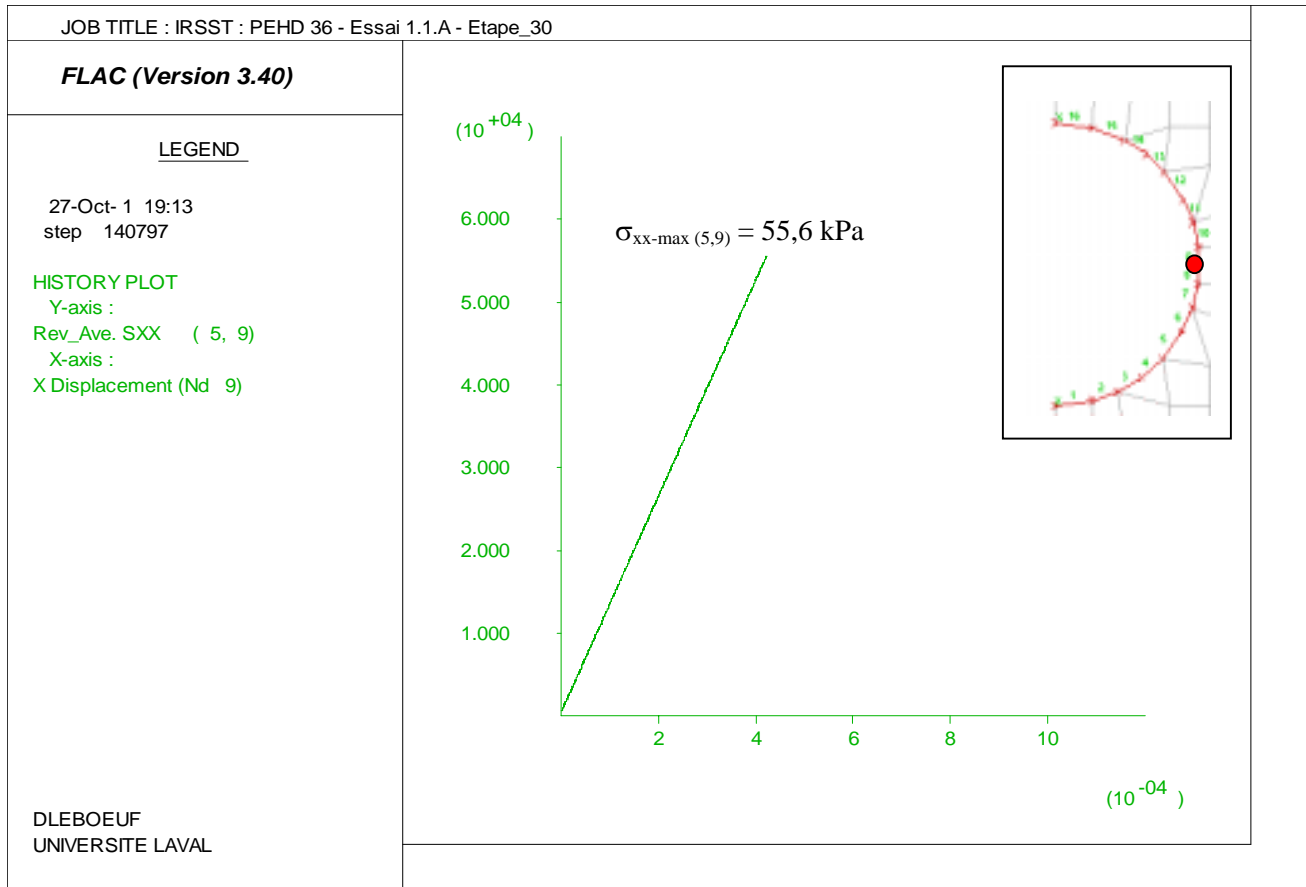


Figure 5.27 - Essai 1.1.A : PEHD-36 - Excavation de type A
Historique de l'évolution du déplacement horizontal (en m) en fct de σ_{xx} (en Pascal)
pour le nœud (5,9) durant le chargement

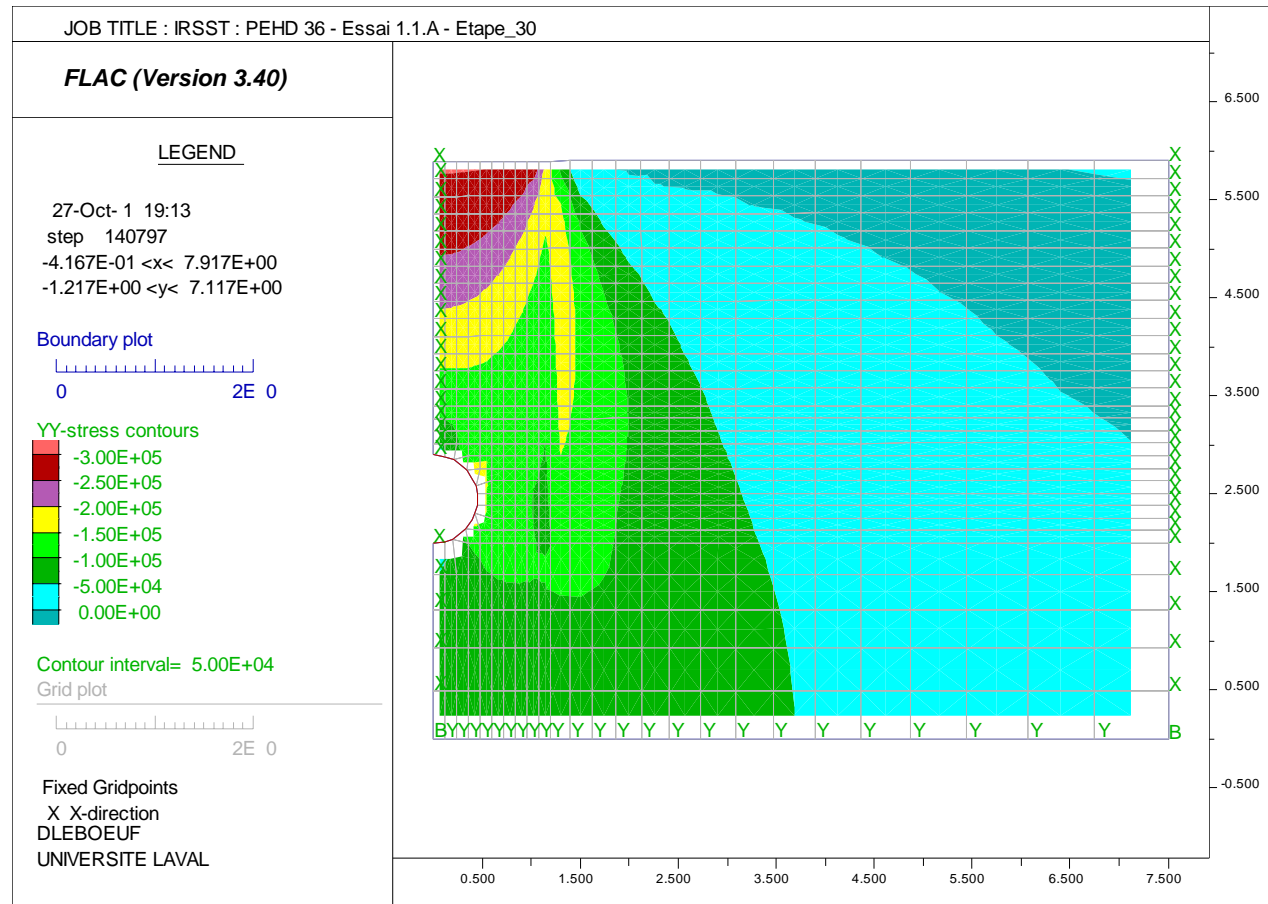
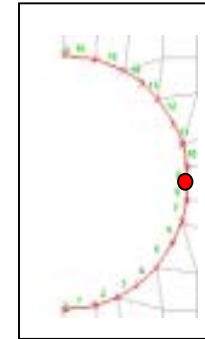


Figure 5.28 - Essai 1.1.A* : PEHD-36 - Excavation de type A
Isocontours de σ_{yy}

Tableau 5.7
Essai 1.1.A* : PEHD-36 - Excavation de type A
Efforts de cisaillement, axiaux et moments dans le tuyau PEHD-36

Dernière étape de chargement ($\sigma_{yy(1,14)}=38,3 \text{ kPa}$; $\sigma_{xx(5,9)}=55,6 \text{ kPa}$)

Elem	ID	Nod1	Nod2	Prop	F-shear (N)	F-axial (N-m)	Mom-1 (N-m)	Mom-2
16	1	16	17	1 beam	-4.918E+02	-2.334E+03	-5.865E+01	4.800E-03
15	1	15	16	1 beam	-1.452E+03	3.358E+03	-1.674E+00	-1.501E+02
14	1	14	15	1 beam	7.131E+01	9.692E+03	4.020E+00	1.678E+00
13	1	13	14	1 beam	-2.375E+02	1.782E+04	-1.496E+01	-4.018E+00
12	1	12	13	1 beam	-9.814E+01	2.408E+04	-2.549E+01	1.496E+01
11	1	11	12	1 beam	-9.337E+01	3.019E+04	-3.294E+01	2.549E+01
10	1	10	11	1 beam	1.427E+01	3.199E+04	-3.180E+01	3.294E+01
9	1	9	10	1 beam	4.742E+01	3.107E+04	-2.900E+01	3.181E+01
8	1	8	9	1 beam	6.973E+01	3.107E+04	-2.488E+01	2.900E+01
7	1	7	8	1 beam	1.495E+02	2.765E+04	-1.291E+01	2.488E+01
6	1	6	7	1 beam	5.006E+01	2.330E+04	-8.901E+00	1.291E+01
5	1	5	6	1 beam	1.949E+02	1.611E+04	1.153E+01	8.900E+00
4	1	4	5	1 beam	1.252E+02	1.051E+04	2.281E+01	-1.153E+01
3	1	3	4	1 beam	-1.377E+02	5.161E+03	1.109E+01	-2.281E+01
2	1	2	3	1 beam	-2.119E+01	-3.881E+02	9.287E+00	-1.109E+01
1	1	1	2	1 beam	5.476E+01	-3.524E+03	1.569E+01	-9.287E+00



6. ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

6.1 Généralités

Il convient, dans un premier temps, de se rappeler du but de l'étude : est-ce que l'utilisation des tuyaux ondulés du type TTAOG ou PEHD constitue une solution fiable et sécuritaire pour l'étançonnement des tranchées? Pour y répondre, les travaux de recherche ont été orientés dans le sens d'une prise en compte des conditions réelles d'utilisation : ceci conduit à une évaluation plus réaliste du comportement et de la performance des tuyaux pour des conditions normales et critiques d'utilisation. Plus spécifiquement, les analyses ont porté sur une évaluation du comportement des tuyaux sous des charges appliquées selon deux scénarios réalistes de chargement (type A et type B). L'approche s'appuie sur une utilisation des essais en chantier, en laboratoire et des simulations informatiques. Les principaux avantages de cette approche sont :

- Une meilleure intégration et combinaison des résultats pour juger la sécurité de ces systèmes;
- Une compréhension approfondie des mécanismes gouvernant le comportement des tuyaux en étançonnement;
- Une identification des conditions de chantier les plus critiques quant à la sécurité des tuyaux en étançonnement.

6.2 Analyse des déplacements

6.2.1 Excavation de type A

Une synthèse des données de chantier, de laboratoire et de simulations est présentée au Tableau 6.1. Ce tableau présente une comparaison des déplacements maximums observés en chantier pour une charge critique (obtenue en appliquant une surcharge avec des blocs) avec les déplacements ultimes (de l'ordre de 20 % D) et admissibles (5 %D).

Les analyses à l'ordinateur avec le logiciel FLAC sont des simulations numériques d'essais de chargement biaxial effectués sur des systèmes sol-tuyau (TTAOG ou PEHD). Ces analyses révèlent que les contraintes qui se développent dans et autour du tuyau ne sont pas uniformes et ce sont celles qui, dans la réalité, se développeraient naturellement, en fonction des rigidités relatives du tuyau et du sol. Les états de contraintes et de déformations ainsi calculés sont donc un reflet assez fidèle des mécanismes en jeu sur le terrain. Les niveaux de contrainte atteints dans les essais numériques dépendent de la réponse du tuyau et varient d'un essai à l'autre. Ils sont, généralement, légèrement supérieurs aux niveaux de contrainte probablement atteints durant le chargement critique en chantier (c'est-à-dire lorsque le sable et les blocs de béton sont présents).

**Tableau 6.1 - Excavation de type « A »
Tableau récapitulatif des déplacements**

Tuyau	CHANTIER			LABORATOIRE		SIMULATION INFORMATIQUE	
	Δ_{y-max} (mm)	Δ_{x-max} (mm)	Δ_y / Δ_x	Δ_{ultime} (mm)	$\Delta_{5\%D}$ (mm)	Δ_{y-max} (mm)	Δ_{xd-max} (mm)
TTAOG-36 <i>(Longueuil)</i>	26 (2,9 %D)	26 (2,9 %D)	1,00	137,1 (15,2 %D)	45	1,10 (0,12 %D)	0,98 (0,11 %D)
PEHD-36 <i>(Longueuil)</i>	--	--	--	151,3 (16,8 %D)	45	1,73 (0,19 %D)	0,844 (0,09 %D)
TTAOG-60 <i>(Victoriaville)</i>	11 (0,7 %D)	4 (0,3 %D)	2,75	301 (20,1 %D)	75	1,22 (0,13 %D)	1,08 (0,07 %D)

Les observations suivantes peuvent être énoncées à partir du tableau 6.1 :

- Rappelons que la pression horizontale à la base des tuyaux calculée selon la théorie classique Rankine (Terzaghi, K. et al, 1996) ne doit probablement pas dépasser environ 35 kPa à 40 kPa;
- Les déplacements diamétraux ne sont pas constants et peuvent varier eux-mêmes par un facteur de 2 ou 3 le long de l'axe longitudinal du tuyau. Dans certains cas, les déplacements sont plus grands dans la partie supérieure que dans la partie inférieure du tuyau. Ces observations reflètent donc la variabilité naturelle des propriétés des sols et matériaux de même que la complexité du chargement;
- C'est le TTAOG-36 lors de l'essai 1.1.A qui présente les déplacements les plus importants;
- Les déplacements sont très faibles pour tous les types de tuyaux. Tous les tuyaux sont sécuritaires. Aussi, étant dans le domaine de très petits déplacements, les multiples perdent un peu de leur sens car ils sont dans les limites des tolérances de l'appareil de mesure.

Il convient également de relever les points suivants en relation avec le tableau 6.1 :

- Les déplacements prédits par les simulations numériques sont réalistes et sont du même ordre de grandeur que ceux observés sur le chantier;
- Les simulations avec FLAC permettent de bien prendre en compte la géométrie complexe du problème : tranchée rectangulaire, sol encaissant ayant des propriétés différentes du sol remblayé;
- La qualité de la concordance des mesures est d'autant plus excellente que, pour simplifier les analyses, l'évaluation des propriétés mécaniques du sol n'a pas fait l'objet de travaux particuliers et que la non-linéarité du comportement du tuyau à des niveaux de contraintes élevés n'a pas été considérée.

Le tableau 6.2 présente une évaluation de la sécurité des systèmes TTAOG-36 ou 60 à partir des mesures de déplacements. Un coefficient de sécurité dit critique ($CS_{critique}$) a été utilisé. $CS_{critique}$ confronte les déplacements observés en chantier avec les déplacements ultimes, à la rupture, mesurés en laboratoire.

Il est défini comme :

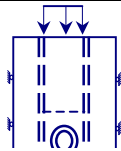
$$CS_{critique} = \frac{\Delta_{ultime-labo}}{\Delta_{chantier}} \tag{6.1}$$

La valeur du coefficient de sécurité $CS_{critique}$ doit être supérieure à au moins 4 lorsque les déplacements sont utilisés.

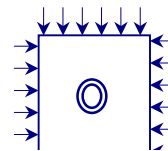
Les coefficients de sécurité ($CS_{critique}$) en déplacement obtenus pour les tranchées de type A sont présentés au tableau 6.2. Ce tableau donne également les CS pour les essais numériques correspondants effectués avec FLAC. Ce tableau indique que la sécurité évaluée en termes de déplacements est bien assurée dans tous les cas. Les coefficients obtenus pour les simulations sont largement supérieurs à 4.

Tableau 6.2 - Excavation de type « A »
Coefficients de sécurité (en fonction des déplacements)

Tuyau	CHANTIER		SIMULATION	
	$\frac{\Delta_{ultime}}{\Delta_{y-max}}$ $CS_{critique}$	$\frac{\Delta_{5\%D}}{\Delta_{y-max}}$	$\frac{\Delta_{ultime}}{\Delta_{y-max}}$ $CS_{critique}$	$\frac{\Delta_{5\%D}}{\Delta_{y-max}}$
TTAOG-36 (Longueuil)	5,3	1,7	125	41
PEHD-36 (Longueuil)	--	--	87	26
TTAOG-60 (Victoriaville)	27	19	247	61



Excavation de type 'A'



Excavation de type 'B'

6.2.2 Excavation de type B

Le tableau 6.3 regroupe les données de déplacements obtenues pour les essais en chantier, en laboratoire et par simulations. De façon analogue au tableau 6.1, ce tableau présente une comparaison des déplacements maximums observés en chantier (pour chaque essai, la plus grande des valeurs de déplacements est présentée) pour la charge critique (sable + blocs) avec les déplacements ultimes (de l'ordre de 20 % D) et admissibles (5 %D). Notons que ce tableau présente les résultats pour le tuyau PEHD pour lequel seuls des essais en chantier de type B ont été effectués.

**Tableau 6.3 - Excavation de type « B »
Tableau récapitulatif des déplacements**

Tuyau	CHANTIER			LABORATOIRE		SIMULATION	
	Δ_{y-max} (mm)	Δ_{x-max} (mm)	Δ_y / Δ_x	Δ_{ultime} (mm)	$\Delta_{5 \%D}$ (mm)	Δ_{y-max} (mm)	Δ_{x-max} (mm)
TTAOG-36 (Longueuil)	26 (2,9 %D)	13 (1,4 %D)	2,00	137,1 (15,2 %D)	45	--	--
PEHD-36 (Longueuil)	9 (1,0 %D)	8 (0,9 %D)	1,13	151,3 (16,8 %D)	45	--	--
TTAOG-60 (Victoriaville)	-7* (-0,5 %D)	-7* (-0,5 %D)	1,00	301 (20,1 %D)	75	1,52 (0,10 %D)	1,07 (0,07 %D)

* Un signe négatif signifie un allongement du diamètre

Les coefficients de sécurité correspondants ($CS_{critique}$) sont présentés au tableau 6.4. Les tableaux 6.2 et 6.4 utilisent les mêmes valeurs de Δ_{ultime} et $\Delta_{5 \%D}$ de référence du laboratoire.

**Tableau 6.4 - Excavation de type « B »
Coefficients de sécurité (en fonction des déplacements)**

Tuyau	CHANTIER		SIMULATION	
	$\Delta_{ultime} / \Delta_{y-max}$ $CS_{critique}$	$\Delta_{5 \%D} / \Delta_{y-max}$	$\Delta_{ultime} / \Delta_{y-max}$ $CS_{critique}$	$\Delta_{5 \%D} / \Delta_{y-max}$
TTAOG-36 (Longueuil)	5,3	1,7	--	--
PEHD-36 (Longueuil)	16,8	5,0	--	--
TTAOG-60 (Victoriaville)	(-)43	(-)10,7	198	49

Une observation importante, pour le TTAOG-36 et le TTAOG-60, est que les déplacements pour une tranchée de type B, sont plus faibles que ceux observés pour les tranchées de type A. Les points suivants peuvent aussi être mis en évidence :

- Comportement plus sécuritaire malgré le fait que les tuyaux soient sollicités sur toute leur périphérie;
- Augmentation du diamètre du TTAOG-60 avec le chargement;
- Comportement satisfaisant du PEHD-36 avec des CS supérieurs à 5;

- Les déplacements numériques calculés sont très faibles et vont également dans le sens d'une augmentation marquée de la rigidité du TTAOG-60;
- La rigidité, les déformations et les contraintes dépendent du mode de chargement et des conditions aux frontières et ne sont pas uniquement une fonction des propriétés du sol comme le suggère la théorie classique de Rankine.

Les résultats, à priori surprenants, pour le TTAOG-60 mettent en évidence la difficulté de mesurer correctement les déformations dans un tuyau ondulé.

6.3 Analyse des forces

Les analyses effectuées avec FLAC ont permis de calculer, de façon approchée, la force résultante σ_y appliquée sur le tuyau en faisant la sommation de σ_{yy} appliquée par les éléments en contact direct avec le tuyau.

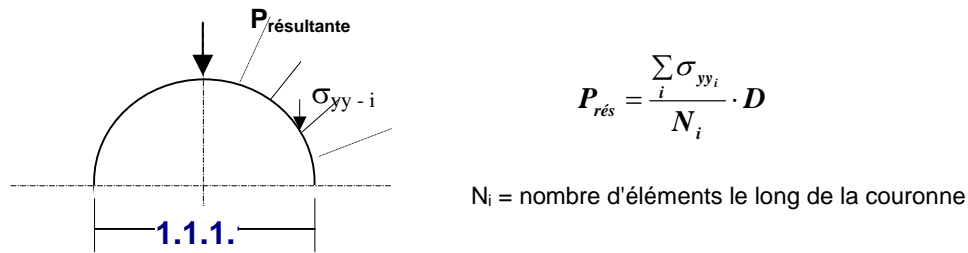


Figure 6.1 - Calcul de la force résultante (P_{res}) sur une section du tuyau avec FLAC

Les forces $P_{résultant}$ calculées avec FLAC sont ainsi comparées dans le tableau 6.5 aux charges ultimes et admissibles (en kN/m) obtenues lors des essais en laboratoire.

Tableau 6.5 - Analyse des forces appliquées sur les tuyaux

Tuyau	SIMULATION		LABORATOIRE	
	TYPE « A » P_{res} (kN/m)	TYPE « B » P_{res} (kN/m)	Charge ultime (kN/m)	Charge à $\Delta_y=5\%D$ (kN/m)
TTAOG-36	84,9	--	11,05	7,98
PEHD-36	111,4	--	14,94	8,00
TTAOG-60	97,6	112,5	25,31	11,42

On observe que pour les tranchées de type A, les forces calculées sont de 4 à 8 fois supérieures aux charges ultimes pour les trois tuyaux. La même constatation s'applique également pour le TTAOG-60 pour la tranchée de type B, où la force résultante est 4,5 fois supérieure à la charge

limite. Cependant, le tuyau reste dans un état largement sécuritaire puisque les déplacements calculés (et observés) demeurent largement inférieurs à la limite élastique.

Le meilleur comportement lors des essais de type B s'expliquent, d'une part, par le confinement complet du tuyau, qui en augmente la rigidité (alors qu'en laboratoire, tous les essais se font sans aucun confinement) et par l'effet d'arche qui modifie le comportement et le transfert des contraintes au voisinage du tuyau. Les résultats de la simulation sur le TTAOG-36 montrés à la figure 6.2 illustrent très bien cet effet d'arche qui se développe autour de la couronne. La contrainte σ_{yy} est minimale au sommet de la couronne ($\theta = 90^\circ$ (élément (1,20)) et va en augmentant pour atteindre un maximum à mi-chemin entre les axes x et y ($\theta = 45^\circ$ (élément (1,20))). Cette rotation du tenseur de contraintes découle de la présence du tuyau et des contrastes de rigidité sol-tuyau.

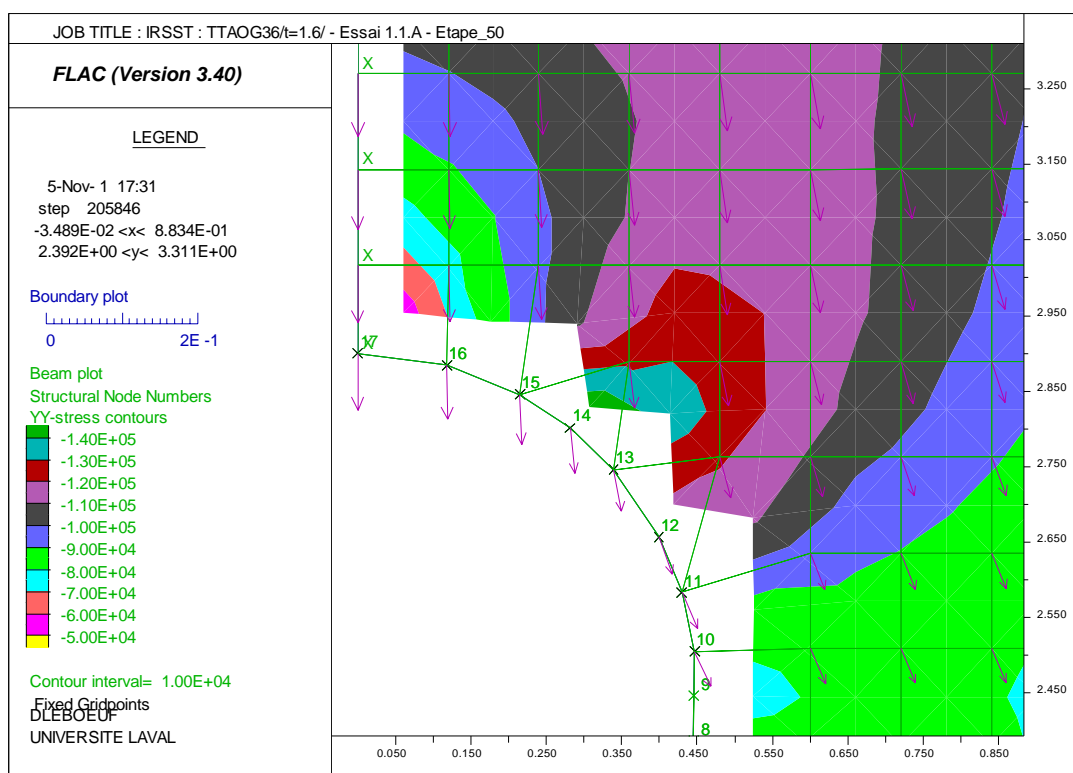


Figure 6.2 - Isocontours de la contrainte σ_{yy} montrant les secteurs de concentration des contraintes autour du tuyau – Essai 1.1.1A – TTAOG-36

6.4 Performance en chantier

Les observations faites lors des deux journées d'essais en chantier permettent de mettre en évidence les points suivants :

- Excellent comportement en chantier malgré les conditions très critiques;

- Les déplacements enregistrés sont très petits (2,9 %D pour le TTAOG-36, 1 % pour le PEHD-36 et 0,7 % pour le TTAOG-60) comparés aux déplacements admissibles (5 %D);
- Les tuyaux ont demeuré en tout temps durant les essais dans le domaine élastique, ce qui leur confère un niveau de sécurité accru compte tenu de l'excellente capacité de recouvrement (rebond) des tuyaux dans ce domaine élastique. Par ailleurs, cette observation prend toute son importance si on considère le fait que ces tuyaux sont utilisés de façon répétitive;
- Les conditions les plus critiques se sont avérées celles reliées à la tranchée de type A. Ceci s'explique par le fait que le chargement se fait d'un seul côté, donc avec un confinement moindre. Ceci a également été vérifié par les simulations.

7. CONCLUSION

L'objet de cette étude est la validation du concept d'utilisation d'un profilé cylindrique en polyéthylène haute densité (PEHD) ou en tôle d'acier ondulé galvanisé (TTAOG) comme structure d'étançonnement pour les travaux d'excavation à court terme.

Cette étude s'appuie sur une méthodologie intégrant les résultats d'essais en chantier, d'essais en laboratoire et des simulations numériques. Cette approche présente de nombreux avantages : en plus d'apporter une meilleure intégration et combinaison des résultats, elle rend possible une compréhension approfondie des mécanismes gouvernant le comportement des tuyaux en étançonnement et une identification des conditions de chantier les plus critiques.

7.1 Rappel du programme d'essais

a) Essais en chantier

Une série de cinq essais en chantier ont été effectués sur deux sites différents situés à Longueuil et Victoriaville, les 19 et 21 juin 2001. Voici les principales caractéristiques de ces essais :

- Trois types de tuyaux ont été utilisés :
 - tuyau TTAOG-36 (diamètre nominal $\Phi = 900$ mm) dans deux essais à Longueuil (essais 1.1.A et 1.1.B);
 - tuyau PEHD-36 ($\Phi = 900$ mm) dans un essai à Longueuil (essai 1.2.B);
 - tuyau TTAOG-60 ($\Phi = 1\ 500$ mm) dans deux essais à Victoriaville (essais 2.3.A et 2.3.B);
- Chaque essai comporte quatre grandes étapes :
 - excavation;
 - mise en place des tuyaux en fond de fouille en position verticale;
 - mise en charge des tuyaux;
 - mesures et observations;
- Chargement des tuyaux en deux étapes (les déformations du tuyau sont mesurées après chacune des étapes de chargement):
 - remblayage par un sable uniforme;
 - application d'une surcharge (constituée par quatre blocs (Longueuil) ou six blocs (Victoriaville) de béton posés près du tuyau);
- Deux types d'excavation :
 - type « A » : tranchée rectangulaire avec trois parois verticales et une seule paroi inclinée à 45°. L'essai proprement dit se fait par déversement de sable sur la paroi inclinée et vise à simuler la poussée des terres pouvant résulter d'un glissement ou d'un éboulement de

paroi (essais 1.1.A (Longueuil) et 2.3.A (Victoriaville)). La fouille est complètement comblée et des blocs en surcharge sont déposés tout près du tuyau sur le sable remblayé;

- type « B » : tranchée pratiquement carrée avec les quatre parois inclinées à 45°. L'essai se fait en remplissant progressivement et uniformément la fouille sur toute la périphérie du tuyau. Cet essai vise à étudier le comportement d'un tuyau sous l'effet d'une compression uniforme par la poussée des terres. Ce mode de chargement permet de simuler la poussée des terres résultant d'un glissement ou d'un éboulement des quatre parois (essais 1.1.B et 1.2.B) (Longueuil) et 2.3.B (Victoriaville)). La fouille est complètement remplie de sable et les blocs en surcharge sont déposés près du tuyau (sur le sable remblayé).

b) Essais en laboratoire

Des essais en laboratoire ont été effectués sur les trois types de profilés (PEHD-36, TTAOG-36, TTAOG-60). Les principaux éléments de ce programme d'essais en laboratoire sont :

- Trois spécimens de chaque tuyau ont été mis à l'essai, à l'exception du TTAOG-60 où seulement deux spécimens furent testés;
- Les profilés sont soumis à une sollicitation transversale à l'aide de 2 plaques parallèles (« Parallel Plate Test », norme ASTM D2412);
- Les essais ont permis de :
 - caractériser la rigidité de la conduite;
 - déterminer les relations forces-déplacements et leurs valeurs caractéristiques (forces et déplacements à la limite élastique et à l'état ultime).

c) Simulations numériques

Une série de quatre simulations numériques des systèmes sol-tuyau ont été effectuées dans cette étude. Voici les principales caractéristiques de ce volet de l'étude :

- Objectifs des simulations :
 - déterminer la distribution des pressions autour des tuyaux TTAOG-36, TTAOG-60 et PEHD-36 pour les deux modes d'excavation et de remblayage utilisés pour les essais en chantier;
 - déterminer les déplacements verticaux et horizontaux du tuyau en contact avec le sol;
 - étudier la distribution des efforts axiaux, tranchants et de flexion se développant dans le tuyau;
- Caractéristiques des modèles numériques :
 - logiciel utilisé : FLAC (Itasca Consulting Group Ltd) - utilise la méthode des différences finies);

- tuyau PEHD-36 ou TTAOG-36 ou TTAOG-60 en contact avec un sol élastique et soumis, à un chargement bi-axial, dans le plan horizontal;
- le tuyau est représenté par une série d'éléments poutres élastiques dont les caractéristiques géométriques et mécaniques;
- le problème est symétrique par rapport à l'axe vertical du tuyau et est analysé en déformations planes;
- les simulations ont reproduit les deux configurations d'essais en chantier (type A et type B).

7.2 Conclusions générales

Les observations faites lors des deux journées d'essais en chantier ainsi que par les simulations numériques et les essais en laboratoire permettent de mettre en évidence les points suivants :

- Excellent comportement en chantier malgré les conditions de chargement très sévères imposées;
- Les déplacements enregistrés sont très petits (2,9 %D pour le TTAOG-36, 1 % pour le PEHD-36 et 0,7 % pour le TTAOG-60) comparés aux déplacements admissibles (5 %D);
- Dans les deux types d'essais en chantier (types A et B) ainsi que dans les quatre simulations numériques effectuées, les coefficients de sécurité (en déplacements) sont tous demeurés supérieurs à 4, et ce, pour les trois types de tuyaux;
- Dans tous les essais en chantier, les trois types de tuyaux n'ont été sollicités que dans le domaine élastique. Les analyses numériques confirment également que les niveaux de contraintes et de déformations dans les tuyaux sont demeurés dans le domaine élastique;
- Aucune déformation plastique ou permanente significative, localisée ou globale, n'a été relevée dans les tuyaux;
- Les essais en laboratoire ont confirmé le potentiel de recouvrement (rebond) des tuyaux TTAOG ou PEHD lorsque ceux-ci sont sollicités dans le domaine élastique. Cette observation prend toute son importance si on considère le fait que ces tuyaux sont utilisés de façon répétitive;
- Les conditions les plus critiques se sont avérées celles reliées à la tranchée de type A. Ceci s'explique par le fait que le chargement se fait principalement sur un seul côté, donc avec un confinement moindre, comparé au chargement sur tous les côtés. Les simulations numériques ont confirmé que cette situation constituait la condition la plus critique;
- Les tuyaux TTAOG-36, TTAOG-60 et PEHD-36 peuvent être utilisés de façon sécuritaire lors des travaux d'excavation municipaux habituels. Ces tuyaux doivent être manipulés avec soin. Ils doivent également être gardés à l'abri des chocs et inspectés avant chaque utilisation. Toute déformation de type plastique de l'enveloppe du tuyau entraînera sa mise au rebut.

7.3 Conclusions spécifiques et recommandations

Les essais terrain, en chantier et les simulations électroniques avec le code FLAC ont permis d'étudier le comportement et d'évaluer la résistance du TTAOG-36, TTAOG-60 et PEHD-36 sous des conditions typiques de chantier en remblayant l'excavation avec du sable et en appliquant une surcharge composée de blocs de béton (quatre blocs et six blocs de béton à Longueuil et à Victoriaville). L'utilisation du sable valide la poussée des sols fréquemment rencontrés dans les villes du Québec. Durant les essais, même si les TTAOG-36, TTAOG-60 et le PEHD-36 ont été soumis aux conditions sévères de chargement qui ne seront jamais atteintes dans les travaux municipaux courants, il n'y a pas eu de rupture locale ou globale et aucune déformation plastique n'a été observée. Les TTAOG-36, TTAOG-60 et le PEHD-36 sont restés dans le domaine élastique. Ils ont donc réussi avec succès aux essais auxquels ils étaient soumis.

Dès lors, nous pouvons conclure que le TTAOG-36, le TTAOG-60, le PEHD-36 et les tuyaux qui ont une rigidité supérieure à celle des tuyaux testés peuvent être utilisés en toute sécurité comme un moyen d'étançonnement lors des travaux d'excavation municipaux où il est difficile d'utiliser les systèmes éprouvés de blindage et/ou il est difficile d'excaver avec une rétroexcavatrice. Lors de ces travaux, l'excavation est effectuée par hydrocuretage et le PEHD ou le TTAOG est alors descendu dans le puits pour étançonner l'excavation. Pour les tuyaux ayant une rigidité inférieure à celle testée, il faut procéder à une validation structurale avant de les utiliser.

Des difficultés de manutention et d'accès sont présentes lors de l'utilisation de ces tuyaux comme étançonnement temporaire lors des travaux d'excavation. La manutention du TTAOG-36 peut se faire manuellement par deux travailleurs, mais celle du TTAOG-60 doit obligatoirement se faire avec un dispositif de levage mécanique. Les accessoires d'accès, par exemple, une échelle ou des échelons, doivent être prévus pour permettre aux travailleurs d'accéder et de quitter aisément la surface de travail et en cas d'accidents, d'être évacués rapidement dans des conditions adéquates.

À la lumière de nos observations en chantier, même si un travailleur peut effectuer efficacement certains travaux en fond d'excavation d'un tuyau de 36 pouces de diamètre, nous recommandons d'utiliser un tuyau d'au moins 48 pouces de diamètre. Ce tuyau donne au travailleur l'espace adéquat pour effectuer aisément sa tâche. Le tuyau de 60 pouces de diamètre offre beaucoup d'espace au travailleur pour œuvrer en fond d'excavation. Il convient donc pour les gros travaux, mais son utilisation occasionne un volume important de déblai.

RÉFÉRENCES GÉNÉRALES

Bouchard, P., 1989, « Tableau synthèse des accidents reliés à l'effondrement de parois d'excavation et enquêtes par les services d'inspection ». CSST. Document interne.

Lan, A., Arteau, J., Tremblay, M., Gamelin, S. et Dugré, J.-M., 1997, « Conception d'un étançonnement adapté au milieu urbain - Phase I », *Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec*, Rapport R-156, Montréal.

LeBoeuf, D., Chaallal, O., octobre 2001, « Validation d'un étançonnement fait d'un tuyau de polyéthylène haute densité (PEHD) ou de profilés métalliques normalement utilisés pour les ponceaux et les égouts », rapport final, Université Laval, Québec.

Stanevick, R.L. et Middleton, D.C., 1988, « An explanatory analysis of excavation cave-in fatalities ». *Professional Safety*, p. 24-28.

Terzaghi, K., Peck, R.B. et Mesri, G., 1996, « Soil Mechanics in Engineering Practice », 3^e édition, *J. Wiley & Sons*, p. 549).

Tremblay, M., 1994, « Développement d'un nouveau système de blindage pour les tranchées de faible profondeur », APSAM, Colloque sur la sécurité dans les tranchées et les excavations.

ANNEXE

RÉFÉRENCES

Ces références sont citées dans : LeBoeuf, D., Chaallal, O., « *Validation d'un étançonnement fait d'un tuyau de polyéthylène haute densité (PEHD) ou de profilés métalliques normalement utilisés pour les ponceaux et les égouts* », Université Laval, rapport final, Laval, octobre 2001.

A.1 LISTE DES NORMES ET OUVRAGES DE RÉFÉRENCE

- AASHTO, LRFD Bridge Design Specification, 1^{re} éd., American Association of State Highway Transportation Officials, Washington, D.C. USA., 1994.
- AASHTO, Standard Specification for Corrugated Steel Pipe, Metallic-coated for Sewers and Drains, AASHTO M 36M-98, Interim Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C. USA., 1999.
- AASHTO, Standard Specification for Corrugated Steel Structural Plate, Zinc-coated, for Field-Bolted Pipe, Pipes-Arches, and Arches, AASHTO M 167M-98, Interim Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., USA., 1999.
- AASHTO, Standard Specification for Corrugated Aluminum Pipe for Sewers and Drains, AASHTO M196M-92, Interim Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., USA., 1999.
- AASHTO, Standard Specification for Corrugated Steel Pipe, Polymer Pre-coated, for Sewers and Drains, AASHTO M 245M-91, Interim Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., USA, 1999.
- A.I.S.I., Modern Sewer Design, American Iron and Steel Institute, Washington, D.C., 319 p., 1980.
- A.I.S.I., Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products, American Iron and Steel Institute, Washington, D.C., 413 p., 1984,
- ASCE, Gravity Sanitary Sewer Design and Construction, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice N° 60, WPCF Manual of Practice N° FD-5, ASME New York, NY, 275 p., 1982.
- Association canadienne de normalisation (Canadian Standards Association), CAN3-G401-M81: Tuyaux en tôle ondulée, Norme nationale du Canada, Association canadienne de normalisation, Rexdale, Ontario, Canada, 1982.
- BOLDUC, G., Report on tests of hydraulic capacity of five different diameters of corrugated plastic culvert pipes manufactured by Big '0' Drain Tile Company, Ltd. Dept. Ag. Eng., Macdonald College of McGill University Ste-Anne-de-Bellevue, 1983.
- BOLDUC, G.F., The capacity of corrugated plastic tubing to support earth loads. Dept. of Ag. Eng., Macdonald College of McGill University, Ste-Anne-de-Bellevue.

- MOSER A.P., Buried Pipe Design, McGraw-Hill, Inc., New York, NY, 219 p., 1990.
- TUBECON IN., Canalisations et éléments préfabriqués en béton : Manuel technique, Association québécoise des fabricants de tuyaux de béton, Longueuil, Québec, Canada, 154 p., 1995.
- WATKINS, R.K et ANDERSON, L.R., Structural Mechanics of Buried Pipes, CRC Press, New York, NY, 444 p., 1999.

A.2 LISTE DES PUBLICATIONS TECHNIQUES

- BROWN, C.B., GREEN, D.R. et PAWSEY, S., Flexible Culverts Under High Fills, Proc. ASCE, vol. 94, n° ST4, p. 905-917, 1968.
- BURNS, Q. et RICHARD, M., Attenuation of Stresses for Buried Cylinders, Proc., Symposium of Soil-Structure Interaction, University of Arizona Eng. Research Lab., Tucson, Arizona, 1964.
- GARBER, J.D. et al., Feasibility of Applying Cathodic Protection to Underground Corrugated Steel Pipe, Transportation Research Record 1371, p. 154-161, 1992.
- GABRIEL, H.L., BENNETT, N.O. et SCHNEIER, B., « Polyethylene Pipe Specifications », NCHRP Project 20-7, Task 68, janvier 1996.
- GABRIEL, LESTER H. et GODDARD, J.B. Curved Beam Stiffness for Thermoplastic Gravity Flow Drainage Pipes, 1999.
- HARTLEY, D.J. et DUNCAN, M.J., E' et Ms Variation with Depth, ASCE Journal of Transportation Engineering, vol. 113, n° 5, 1987.
- HAVENS, B.T. et al., Longitudinal Strength and Stiffness of Corrugated Steel-Pipe, Transportation Research Record N. 1514, p. 1-9, 1995.
- HAVILAND, J.E., BELLAIR, P.J. et MORRELL, V.D., Durability of Corrugated Metal Culverts, Report for Dept of Trans., State of New York, 1967.
- KATONA, G. MICHAEL et AKL, Y. ADEL, Design of Buried Culverts with Stress-Relieving Joints, Transportation Research Record 1129, p. 39-54, 1987.
- LESTER, H.G. et ERIC, T.M., Service Life of Drainage Pipe NCHRP Synthesis 254, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, 1998.
- LUSCHER, U., Buckling of Soil-Surrounded Tubes, Proc. ASCE, vol. 92, n° SM6, 1966.
- MARTSON, A. et ANDERSON, A.O., The Theory of Loads on Pipe in Ditches and Tests of Cement and Clay Drain Tile and Sewer Pipe, Bull. N° 31, Eng. Exper. Sta., Iowa State College (1913).
- MARTSON, A., The Theory of External Loads on Closed Conduits in the Light of the Latest Experiments, Bull. N° 96, Eng. Exper. Sta., Iowa State College, 1930.
- MEYERHOF, G.G. et BAIKE, L.D. Strength of Steel Culverts Sheets Bearing against Compacted Sand Backfill, Highway Research Board Proceedings, vol. 30, 1963.

- MOORE, I.D., Three-Dimensional Response of Profiled PE Pipe, University of Western Ontario, London, Ontario, Canada, 1992.
- MOORE, I.D. and Hu, F., Response of Profiled High Density PE Pipe in Hoop Compression, TRB Record n° 1514, National Research Council, Washington D.C., 1995.
- MOSER, A.P., Buried Pipe Design, McGraw-Hill, Inc., New-York, NY, 219 p.,1990.
- MOSER, A.P., Structural Performance of Buried Profile-Wall High-Density Polyethylene Pipe and Influence of Pipe Wall Geometry, Transportation Research Records, n° 1624, 1998.
- NIELSON F.D., Modulus of Soil Reaction as Determined by the Triaxial Shear Test, Hwy. Res. Record, n° 185, p. 80-90.
- NIELSON F.D., Soil Structure Arching Analysis of Buried Flexible Structures, Hwy. Res. Record n° 185, p. 36-50, 1967.
- PHARES, B.M., WIPF, T.J., KLAIBER, F.W. et LOHNES, R.A., Behavior of High-Density Polyethylene Pipe with Shallow Cover, Transportation Research Record, n° 1624, 1998.
- REEVE, R.C. et WATKINS, R.K., Effect of heavy loads on buried corrugated polyethylene pipe. Advances Drainage Systems Inc., Colombus OH., U.S.A., 1982.
- REEVE, R.C. et WATKINS, R.K., Structural performance of buried corrugated plastic tubing. ASAE., Texas, U.S.A., 1980.
- ROGERS, C.D.F. et al., Structural Performance of Profile-Wall Drainage Pipe – Stiffness Requirements Contrasted with Results of Laboratory and Field Tests, Transportation Research Record 1656, p. 73-79, 1995.
- ROGERS, C.D.F., The Influence of Surrounding Soil on Flexible Pipe Performance, Transportation Research Record 1129, p. 1-11, 1987.
- SELIG, T.E., Long-term Performance of Polyethylene Pipe Under High Fill, University of Massachusetts, juin 1995.
- SPANGLER, M.G., A Practical Application of the Imperfect Ditch Method of Construction, Proc. HRB, vol. 37, p. 271-277, 1958.
- SPANGLER, M.G., Theory of Loads on Negative Projecting Conduits, Proc. HRB, vol. 30, p. 153-161, 1950.
- SPANGLER, M.G., Culverts and Conduits, Foundation Engineering, ed. by G.A. Leonards. McGraw-Hill, p. 997, 1962.
- SPANGLER, M.G., The Structural Design of Flexible Pipe Culverts, Bulletin 153, Iowa Engineering Experiment Station, Ames, Iowa, 1941.
- WATKINS, R.K. et SPANGLER, M.G., Some Characteristics of the Modulus of Passive Resistance of Soil. A Study in Similitude, Proc. HRB, vol. 37, p. 576-583, 1958.

- WATKINS, R.K., Characteristics of the Modulus of Passive Resistance of Soil, Ph.D. dissertation, Iowa State University, 1957.
- WATKINS, R.K. et MOSER, A.P., Response of Corrugated Steel Pipe to External Soil Pressures, Highway Research Record 373, p. 88-112, 1971.
- WATKINS, R.K. et SMITH, A.B., Ring Deflection of Buried Pipe, Journal AWWA, vol. 59, n° 3, 1967.
- WOODS, D.W., KRAUSE-SINGH, J. et HINDMAN, J., Estimation of Long-Term Stress Capacity of HDPE Materials by Tensile Stress-Rupture Testing, Houser Lab., Boulder, Colorado (date not provided).

A.3 LISTE DES RAPORTS TECHNIQUES

- AYLES, J.T. et SMITH, C.C., Performance Characteristics of Circular Corrugated Steel Pipe Culverts, Technical Report 37, Saskatchewan Highways and Transportation, Regina, Saskatchewan, Canada, 1985.
- GABRIEL, LESTER H. et MORAN, ERIC T., Service Life of Drainage Pipe, NCHRP Project 20-5, Topic 25-21, Synthesis of Highway Practice 254, 1998.
- JANSON, L.E., Investigation of the Long-Term Creep Modulus for Buried Polyethylene Pipes Subjected to Constant Deflection, VBB Consulting Group, Stockholm, Sweden (date not provided).
- JANSON, L.E., Long-Term Studies of PVC and PE Pipes Subjected to Forced Constant Deflection, Rapport n° 3 du KP-Council, 1991.
- KATONA, MICHAEL G., Minimum Cover Heights for Corrugated Plastic Pipe Under Vehicle Loading, Transportation Research Records 1288, p. 127-135.
- KUHLMAN, C.J., WEED, D.N. et CAMPBELL, F.S., Accelerated Fracture Mechanics Evaluation of Slow Crack Growth Potential in Corrugated Polyethylene Pipe, Southwest Research Institute, San Antonio, Texas, 1995.
- KUHLMAN, C.J., POPELAR C.H., et MADSEN, T.E., A Test and Analysis Method for Quantifying the Service Life of Polyethylene Corrugated Pipes Used in Gravity Flow Applications. Southwest Research Institute, San Antonio, Texas.